



Pedro Ferreira de Almeida
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Análise de estabilidade de barragens de aterro em fase de esvaziamento

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil (Perfil de Geotecnia)

Orientadora: Prof.^a Doutora Teresa Santana, FCT-UNL
Coorientadora: Eng.^a Ana Quintela, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra, FCT-UNL

Arguente: Doutor João Marcelino Mateus da Silva, LNEC

Vogais: Prof.^a Doutora Teresa Santana, FCT-UNL

Eng.^a Ana Quintela, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio 2013

“Copyright” **Pedro Ferreira de Almeida, FCT/UNL e UNL**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

O trabalho desenvolvido por mim nesta dissertação, resultou não apenas do meu esforço e dedicação, mas também da ajuda de pessoas e instituições às quais deixo um agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora Professora Doutora Teresa Santana assim como à minha coorientadora Engenheira Ana Quintela, tanto pelos conhecimentos e disponibilidade que sempre tiveram para me ajudar, mas também pela simpatia e pelo prazer que foi trabalhar com ambas.

Gostaria também de agradecer à Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologias, e em especial ao departamento de Engenharia Civil, pela possibilidade de aprender através do seu corpo docente como também pelos materiais disponibilizados, não só para desenvolver esta dissertação mas também ao longo do meu percurso académico.

Finalmente, e não menos importante, deixo também um agradecimento muito especial à minha família e amigos e em especial aos meus pais e à minha irmã Marta. O seu apoio e o incentivo foi e será sempre vital para alcançar os objetivos que estabeleço.

Resumo

O esvaziamento rápido da albufeira de uma barragem de aterro pode provocar instabilidade na estrutura devido às pressões intersticiais que permanecem no seu interior imediatamente após o esvaziamento. Nesta situação é necessário efetuar uma análise de percolação em regime transitório podendo o recurso a uma ferramenta de análise que utilize o método dos elementos finitos ser de bastante utilidade.

Neste trabalho, será utilizado o programa Plaxis2D que, na sua versão atual, permite acoplar a análise de deformação e o estudo da percolação, em regime transitório, na análise de estabilidade utilizando o método dos elementos finitos.

Efetuar-se-á uma análise paramétrica onde serão estudados os fatores que influenciam a estabilidade de uma barragem de aterro em fase de esvaziamento rápido num modelo académico, variando a permeabilidade do maciço estabilizador, a inclinação do maciço estabilizador de montante e a velocidade de esvaziamento da albufeira, relacionando estas variáveis com a estabilidade da estrutura.

Serão também comparados dois métodos de análise de estabilidade nesta situação para o caso da barragem de Alcobertas, um deles utilizando o programa Plaxis 2D e outro através de um método de equilíbrio limite. Reconhecendo as limitações associadas ao dimensionamento através do método de equilíbrio limite no estudo do esvaziamento rápido, procurar-se-á perceber se os resultados são semelhantes aos obtidos com o programa Plaxis 2D.

Termos chave: barragem de aterro; esvaziamento rápido; análise de estabilidade; Plaxis 2D.

Abstract

The rapid drawdown of the reservoir of an embankment dam can cause instability due to the pore pressures that remain inside the structure immediately after the drawdown takes place. In this situation it is necessary to study the percolation in the transitional regime and therefore the use of software that employs the finite element concepts can be very helpful.

In this investigation, the program Plaxis2D will be used due to the fact that, in its current version, allows attaching the deformation analysis and the study of percolation, in a transient behavior, in stability analysis using the finite element method.

There will be studied aspects that influence the stability of an embankment dam in phase of rapid drawdown with a parametric study in an academic model. The permeability of the material used in the upstream slope, the inclination of that same slope and rate of drawdown will be related to the structure stability.

There will also be compared two methods of stability analysis in this situation of a real embankment dam, the dam of Alcobertas, one of them using the program Plaxis 2D and another one using a limit equilibrium method. Recognizing the limitations associated with stability analysis using the limit equilibrium method in the study of rapid drawdown, there will be judged if the results obtained by that method are similar to those obtained with the program Plaxis 2D.

Keywords: embankment dam; rapid drawdown; stability analysis; Plaxis 2D

Índice de matérias

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas	xvii
Lista de símbolos e abreviaturas.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivos e organização da dissertação.....	3
2. Revisão bibliográfica: O esvaziamento rápido em barragens de aterro	7
2.1. Introdução	7
2.2. Descrição e consequências do fenómeno	9
2.3. Fatores condicionantes à estabilidade	14
2.4. Métodos de controlo do escoamento.....	16
2.5. Métodos de avaliação de estabilidade	18
2.5.1. Considerações gerais.....	18
2.5.2. Ábacos de Morgenstern.....	19
2.5.3. Método de equilíbrio limite.....	21
2.5.4. Método dos elementos finitos	25

3. Análise paramétrica: Fatores que influenciam a estabilidade ao esvaziamento rápido	29
3.1. Introdução	29
3.2. Descrição do modelo em estudo	30
3.2.1. Características dos materiais	30
3.2.2. Modelo de cálculo	31
3.2.3. Cálculos	33
3.3. Permeabilidade	34
3.4. Velocidade do esvaziamento	36
3.5. Inclinação do maciço estabilizador de montante	40
3.6. Evolução do fator de segurança ao longo do esvaziamento	43
3.7. Considerações finais	45
4. Caso de estudo: Análise da barragem de Alcobertas	47
4.1. Introdução	47
4.2. Descrição da barragem de Alcobertas	48
4.2.1. Características dos materiais	48
4.2.2. Perfil tipo da barragem	48
4.3. Análise segundo método de equilíbrio limite	50
4.4. Análise com o programa Plaxis 2D	51
4.5. Comparação dos resultados obtidos	54
4.6. Considerações finais	57
5. Conclusões finais e futuros desenvolvimentos	59
6. Bibliografia	63

Índice de figuras

Figura 2.1 Perfil de uma barragem de perfil zonado (adaptado de Stephens, 2011).....	8
Figura 2.2 Evolução do nível de água num maciço estabilizador de montante genérico numa situação de esvaziamento rápido (adaptado de Vallejo et al., 2002).....	11
Figura 2.3 Efeito do rebaixamento do nível de água da albufeira num maciço estabilizador de montante com a) pressões hidrostáticas a atuarem inicialmente b) efeito da mudança de pressões hidrostáticas devido ao rebaixamento do nível de água da albufeira (adaptado de Pinyol et al., 2008)	12
Figura 2.4 Esvaziamento de uma barragem de aterro numa fundação pouco permeável (adaptado de Fell et al.,2005).....	15
Figura 2.5 Esvaziamento com colocação de drenos horizontais (adaptado de Fell et al.,2005) .	17
Figura 2.6 Ábacos de Morgenstern com $c'\gamma * H = 0,025$ (adaptado de Morgenstern, 1963)...	20
Figura 2.7 Envolvente a considerar na análise do esvaziamento rápido (Wright e Duncan, 2003)	22
Figura 3.1 Geometria da barragem em análise.....	32
Figura 3.2 Malha de elementos finitos da barragem em análise	32
Figura 3.3 Evolução do fator de segurança com aumento da permeabilidade do maciço estabilizador	34
Figura 3.4 Posição da linha de percolação para um esvaziamento total da albufeira em um dia com k_h igual em a) $5E-8$ m/s b) $5E-5$ m/s	35
Figura 3.5 Evolução das pressões intersticiais nos pontos a) A e b) B	35
Figura 3.6 Evolução do fator de segurança com o aumento da velocidade	37
Figura 3.7 Evolução do fator de segurança com o aumento da permeabilidade do maciço.....	38
Figura 3.8 Duração mínima do esvaziamento a partir do qual o fator de segurança diminui	40
Figura 3.9 Fator de segurança para diferentes velocidades e diferentes inclinações com $k_h = 5,00E-07$ m/s	41

Figura 3.10 Fator de segurança para diferentes velocidades e diferentes inclinações com $k_h = 5,00E-07$ m/s e $k_h = 5,00E-08$ m/s.....	43
Figura 3.11 Evolução do fator de segurança ao longo do esvaziamento	44
Figura 4.1 Perfil de maior altura da barragem de Alcobertas	49
Figura 4.2 Fase de esvaziamento rápido, superfícies de escorregamento críticas em condições estáticas	51
Figura 4.3 Malha de elementos finitos da barragem de Alcobertas	52
Figura 4.4 Situação de pleno armazenamento com a) posição da linha de percolação e b) Pontos de rotura plástica Mohr-Coulomb	52
Figura 4.5 Deslocamentos totais na barragem provocados pelo esvaziamento	53
Figura 4.6 Relação entre o FS e velocidade de esvaziamento para uma descida do nível de água da barragem de Alcobertas de 8,7 m.....	55
Figura 4.7 Linha de percolação para velocidades de abaixamento de a) 0,62 m/dia b) 17,40 m/dia	56
Figura 4.8 Evolução do fator de segurança ao longo do esvaziamento da barragem de Alcobertas para duas velocidades diferentes	56

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Fatores de segurança segundo a legislação Portuguesa (Portaria nº846/93, 1993) ...	13
Tabela 3.1 Propriedades dos materiais	31
Tabela 3.2 Fator de segurança para diferentes relações k_h/k_v	36
Tabela 3.3 Fator de segurança para diferentes velocidades de esvaziamento	37
Tabela 3.4 Fator de segurança para diferentes permeabilidades do maciço estabilizador	38
Tabela 3.5 Comparação do fator de segurança para diferentes permeabilidades.....	39
Tabela 3.6 Comparação entre regime permanente e regime variável para diferentes inclinações do maciço estabilizador de montante com $k_h=5,00E-7$ m/s	42
Tabela 4.1 Propriedades dos materiais da barragem de Alcobertas	48
Tabela 4.2 Fatores de segurança mínimos na fase de esvaziamento rápido calculados através de um método de equilíbrio limite	51
Tabela 4.3 Fatores de segurança na fase de esvaziamento rápido calculados com o programa Plaxis 2D.....	53
Tabela 4.4 Fatores de segurança ao esvaziamento rápido calculados.....	54
Tabela 4.5 Fatores de segurança para esvaziamento a diferentes velocidades da barragem de Alcobertas	54

Lista de símbolos e abreviaturas

Símbolos

c	Coesão
$(u_a - u_w)$	Sucção mátrica
$(\sigma - u_a)$	Tensão normal líquida
γ	Peso volúmico
γ_d	Peso volúmico seco
γ_{sat}	Peso volúmico saturado
γ_w	Peso volúmico da água
σ_n	Tensão normal total
σ'_n	Tensão normal efetiva
E_{ref}	Módulo de deformabilidade
$H_{1,2,3,4}$	Altura da coluna de água
$k_{maciço}$	Coefficiente de permeabilidade do material utilizado no maciço
k_h	Coefficiente de permeabilidade na direção horizontal
k_v	Coefficiente de permeabilidade na direção vertical
n	Porosidade
S	Grau de saturação
	Sucção
t	Tempo
ν	Coefficiente de Poisson
u	Pressão intersticial
τ	Resistência ao corte

χ	Porção da secção com água
ϕ'	Ângulo de resistência ao corte

Abreviaturas

<i>ASCE</i>	<i>American Society of Civil Engineers</i>
CD	Ensaio consolidado drenado
CU	Ensaio consolidado não drenado
<i>FS</i>	Fator de segurança
<i>ICOLD</i>	<i>International Commission on Large Dams</i>
NMC	Nível de máxima cheia
NME	Nível mínimo de exploração
NPA	Nível de pleno armazenamento
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
<i>USACE</i>	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i>
<i>USBR</i>	<i>U.S. Bureau of Reclamation</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações gerais

Ao longo da história da humanidade as barragens de aterro assumiram um papel fundamental para o desenvolvimento dos territórios e das populações onde estas eram edificadas. A necessidade de armazenamento de água para combater a escassez desta durante o período seco levou à construção deste tipo de estruturas sendo que o seu dimensionamento era feito de forma empírica.

Com o desenvolvimento das técnicas construtivas, assim como a necessidade de construir barragens de aterro de maiores dimensões, e com o maior volume de água armazenado associado a estas, tornou-se fundamental avaliar as consequências do seu colapso procurando assim que o seu dimensionamento salvaguardasse a estabilidade do corpo da estrutura.

O corpo de uma barragem de aterro típica é uma estrutura complexa constituído por diferentes tipos de solos com funções distintas. No caso de materiais granulares como areias, a elevada porosidade que estas apresentam permite que a água percole mais facilmente que no caso de materiais finos como argilas, tornando-se estes ideais para a construção do núcleo de barragens de aterro. Para além do núcleo, que impede a percolação da água, uma barragem de aterro é ainda constituída por dois maciços estabilizadores situados a montante e jusante que visam garantir a estabilidade do corpo da estrutura.

Tendo presente a função dos maciços estabilizadores, devem ser avaliadas as situações condicionantes para a estabilidade de cada um destes. No caso do maciço estabilizador de jusante, a sua estabilidade é avaliada para situações de regime permanente, ou seja, quando o nível de água da albufeira se apresenta constante durante um longo período de tempo. Por sua vez, na fase de construção da barragem de aterro, deve ser avaliada a estabilidade tanto do maciço estabilizador de montante como do maciço estabilizador de jusante. Para situações em que ocorra o esvaziamento rápido da albufeira, deve ser tida em atenção a análise da estabilidade do maciço estabilizador de montante.

O esvaziamento rápido desencadeia uma situação crítica para a estabilidade do maciço estabilizador de montante de uma barragem de aterro. Se a descida da água da albufeira for de tal maneira rápida de modo a não permitir que a dissipação das pressões intersticiais que permanecem no interior da barragem de aterro acompanhem o rebaixamento do nível de água, a estrutura será menos estável e o esvaziamento considerado rápido. Esta redução da estabilidade relaciona-se não só pela água que permanece no maciço estabilizador de montante, que reduz a resistência ao corte e aumenta o peso do material devido à saturação, mas também por deixar de existir a ação estabilizadora que a água da albufeira transmite ao maciço estabilizador de montante na situação de pleno armazenamento.

Para garantir a segurança da barragem de aterro será então importante ter presente que fatores influenciam a estabilidade em fase de esvaziamento rápido. Para além da velocidade do esvaziamento mencionada anteriormente, e por estar relacionada com o modo como a água percola no solo, a permeabilidade é uma condicionante de particular relevância no estudo do esvaziamento rápido. Corroborando com os pressupostos da mecânica dos solos, em que a maior inclinação de um talude implica um incremento das tensões atuantes podendo provocar a rotura do mesmo, uma maior inclinação do maciço estabilizador de montante leva também a que a estabilidade da barragem de aterro seja mais precária numa situação de esvaziamento rápido.

No entanto, apesar de serem conhecidos os fatores que influenciam a estabilidade numa situação de esvaziamento rápido, é também importante ter noção que o momento de maior instabilidade pode não se verificar quando o esvaziamento da albufeira chega ao fim, ou seja, quando esta se encontra vazia. Estudos em 1963 por parte de Sherard et al., em que foi feito um levantamento de colapsos de barragens de aterro devido ao esvaziamento rápido, verificaram que a rotura acontecia antes de se atingir o nível máximo de esvaziamento (Pinyol et al., 2008).

Existe assim uma clara necessidade de proceder a uma avaliação da estabilidade ao esvaziamento rápido no dimensionamento de uma barragem de aterro sendo que tal poderá ser feito fundamentalmente através de métodos de equilíbrio limite com algumas particularidades, ou recorrendo a ferramentas de cálculo que utilizem o método dos elementos finitos.

A análise através de métodos de equilíbrio limite apresenta algumas limitações tais como dificuldade na determinação da resistência ao corte não drenada do solo, a não mudança da localização da superfície de rotura durante o esvaziamento e principalmente não permite ter em conta o tempo que o esvaziamento demora, não existindo assim a possibilidade de simular um regime transitório. Uma boa analogia para este tipo de regime será o esvaziamento de um recipiente através de um orifício, à medida que a superfície vai baixando, pela redução de volume do fluido, a pressão da coluna de fluido diminui assim como a velocidade do fluido que passa no orifício. Por oposição pode-se definir de forma simplificada uma situação de regime permanente como um tipo de escoamento em que o tempo não é uma variável em estudo. Devido a esta limitação, de não ser possível modelar regimes variáveis no dimensionamento através de métodos de equilíbrio limite, a análise com recurso a *software* geotécnico que utilize métodos numéricos como o método dos elementos finitos poderá ser bastante útil no estudo da estabilidade numa situação de esvaziamento rápido.

O programa computacional Plaxis 2D, que aplica o método dos elementos finitos, por permitir não só uma análise acoplada entre tensão/deformação e percolação como também a possibilidade do estudo de regimes variáveis, constitui assim uma ferramenta importante para o estudo da estabilidade de uma barragem de aterro e em particular para uma situação de esvaziamento rápido da sua albufeira. Possibilita também com bastante facilidade ter uma clara noção de quando é obtido um fator de segurança mínimo associado ao esvaziamento ou seja, para que descida do nível de água da albufeira a estrutura se torna menos estável.

1.2. Objetivos e organização da dissertação

A presente dissertação foca-se no estudo dos problemas de estabilidade associados a barragens de aterro em situação de esvaziamento rápido da albufeira. Reconhecendo a importância da avaliação da estabilidade nesta situação, o primeiro objetivo será referir algumas particularidades desse fenómeno assim como o porquê deste influenciar a segurança de uma barragem de aterro.

Identificados os fatores que tornam uma barragem de aterro mais ou menos estável ao esvaziamento rápido é efetuada uma análise paramétrica num modelo académico. Este tipo de análise consiste na aceção de determinadas variáveis como por exemplo os parâmetros de resistência do solo e verificar as consequências que estes pressupostos provocam na estrutura. Neste caso em particular, e no âmbito da presente dissertação, será feita uma análise paramétrica onde serão testados os aspetos que influenciam a estabilidade de uma barragem de aterro ao

esvaziamento rápido de modo a perceber e confirmar a sua relação com a estabilidade da estrutura.

Reconhecendo que existem diferentes métodos de avaliação da segurança ao esvaziamento rápido, é comparado o dimensionamento através de um método de equilíbrio limite com os resultados utilizando um programa computacional que aplica a formulação de um problema geotécnico através do método dos elementos finitos no projeto de uma barragem real. O objetivo desta comparação será verificar se apesar das limitações inerentes a uma análise através de equilíbrio limite este método permite que a estabilidade da estrutura esteja completamente assegurada ao esvaziamento rápido.

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos apresentando-se em seguida uma descrição sucinta dos mesmos.

Capítulo 1- Introdução

O primeiro capítulo pretende destacar não só a importância da avaliação da estabilidade ao esvaziamento rápido mas também referir os fatores que condicionam a estabilidade da estrutura nesta situação como a velocidade do esvaziamento, a permeabilidade do material com que é construído o maciço estabilizador de montante assim como a inclinação deste. Enunciam-se duas maneiras possíveis para avaliação da estabilidade de uma barragem de aterro, tanto através de métodos de equilíbrio limite como com a utilização de *software* que aplique o método dos elementos finitos. São ainda referidos os objetivos que serão estudados assim como o conteúdo de cada capítulo que o leitor consultará ao longo da dissertação.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: O esvaziamento rápido em barragens de aterro

No segundo capítulo, é descrito o fenómeno do esvaziamento rápido e também o porquê deste afetar a estabilidade de uma barragem de aterro. É feita também referência a estudos desenvolvidos por outros autores e como estes identificaram aspetos condicionantes à estabilidade da estrutura durante o esvaziamento rápido da albufeira. São também apresentadas metodologias que permitem fazer a análise de estabilidade de uma barragem de aterro ao esvaziamento rápido.

Capítulo 3- Análise paramétrica: Fatores que influenciam a estabilidade ao esvaziamento rápido

No terceiro capítulo é feita uma análise paramétrica dos parâmetros que se identificaram previamente que podem condicionar a estabilidade em fase de esvaziamento rápido e relacionam-se os mesmos com a segurança da estrutura.

Utilizando alguns dos dados do plano de prospeção da barragem de Alcobertas, e através do pré-dimensionamento desta, é definido um modelo onde são testadas diferentes inclinações do maciço estabilizador de montante, diferentes coeficientes de permeabilidade do material que serve de maciço estabilizador e também diversas velocidades de esvaziamento da albufera sendo retiradas algumas importantes conclusões.

Capítulo 4 - Caso de estudo: Análise da barragem de Alcobertas

No quarto capítulo da presente dissertação analisa-se uma situação de esvaziamento rápido da albufera do projeto da barragem de Alcobertas. É descrita a estrutura e são comparados os resultados entre o dimensionamento efetuado através de um método de equilíbrio limite com os resultados utilizando o programa Plaxis 2D que emprega como ferramenta de cálculo o método dos elementos finitos.

Aproveitando as potencialidades do programa Plaxis 2D, são identificadas e estudadas situações de esvaziamento da albufera que poderão ser críticas à estabilidade da barragem de Alcobertas.

Capítulo 5 - Conclusões finais e futuros desenvolvimentos

Finalmente, no quinto capítulo, apresentam-se as conclusões finais retiradas tanto da análise paramétrica feita no Capítulo 3 como da comparação entre os dois métodos de análise do Capítulo 4. Através destas conclusões são estabelecidas questões que poderão ser úteis responder em estudos futuros do tema analisado, o esvaziamento rápido de barragens de aterro.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica: O esvaziamento rápido em barragens de aterro

2.1. Introdução

As consequências que a rotura de uma barragem de aterro pode causar nas populações que vivem nas suas imediações, devido ao enorme volume de água armazenado, tornam imperativo que se minimizem os riscos de ocorrência de fenómenos que provoquem instabilidade neste tipo de estrutura. No entanto, antes de se estudar a estabilidade de uma barragem de aterro e as possíveis situações que a condicionam, convém mencionar alguns dos seus perfis mais comuns assim como os seus princípios de funcionamento.

Podem-se definir diferentes perfis de barragens de aterro como barragens de aterro com perfil homogéneo ou zonado, barragens de enrocamento que segundo a *International Commission on Large Dams (ICOLD)* dependem da rocha para assegurarem a sua estabilidade, ou barragens mistas de terra e de enrocamento que são variações dos tipos de barragem de aterro expostos anteriormente dependendo essencialmente da natureza e dos materiais disponíveis no local para executar o corpo da barragem (Quintas, 2002).

De um modo geral, uma barragem de aterro resulta da compactação de várias camadas de solos que poderão ser arenosos ou argilosos consoante os existentes no local e as características

pretendidas para os requisitos da estrutura. É no entanto útil definir parte da estrutura de uma barragem de aterro com perfil zonado pois é este o tipo de estrutura que é estudada na presente dissertação. Possuem tipicamente um núcleo pouco permeável argiloso e um corpo da barragem que garante a sua estabilidade com um solo geralmente arenoso sendo que, por vezes, poderá existir a necessidade de incluir também uma proteção do paramento a montante contra a ação destrutiva das ondas (Ferreira et al., 2001). A Figura 2.1 ilustra um exemplo de uma barragem zonada destacando-se a inclusão no pé do maciço de jusante de um filtro para conferir estabilidade e drenar a secção de jusante assim como de um enrocamento na face de montante que, como mencionado anteriormente, permite proteger o maciço de montante da ação destrutiva das ondas (Stephens, 2011).

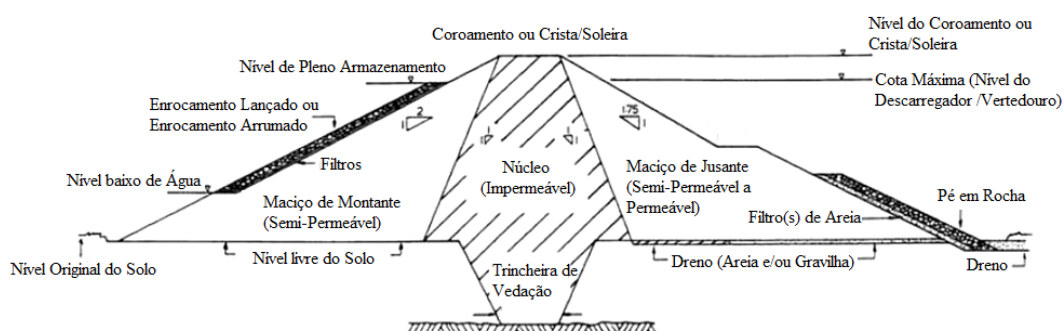


Figura 2.1 Perfil de uma barragem de perfil zonado (adaptado de Stephens, 2011)

Tendo presente estes princípios construtivos, as barragens de aterro devem possuir como exigências funcionais não só garantir que o seu maciço estabilizador de montante está protegido da ação destrutiva das ondas, como o maciço de jusante deve assegurar a longevidade sob a ação das condições climáticas do local. Devem também garantir impermeabilidade suficiente que impeça a perda de água excessiva através do seu corpo, assim como uma geometria que assegure não só a sua estabilidade, mas que também possibilite que o assentamento ao longo do tempo da barragem não atinja valores excessivos (Fell et al., 2005).

Para o bom comportamento da estrutura para além de verificar se esta cumpre as exigências funcionais estabelecidas é também fundamental identificar as ações críticas para a sua estabilidade de modo a que o dimensionamento seja feito corretamente. Durante a fase de construção deve-se ter em conta a estabilidade de ambos os maciços estabilizadores tanto de montante como de jusante, existindo um fator de segurança mínimo para estes definido na legislação Portuguesa de 1,4 para salvaguardar qualquer possível instabilidade que provoque deslizamentos nos maciços (Portaria nº846/93, 1993).

Construída a barragem de aterro é importante conhecer as causas mais comuns que podem provocar o colapso desta. Estima-se que quarenta por cento das roturas de barragens de aterro se

devam a fenómenos de erosão interna pela fundação, núcleo ou dos maciços estabilizadores. As restantes roturas devem-se a galgamentos devido a cheias e deslizamentos provocados tanto pelo nível freático elevado no maciço estabilizador de jusante na situação de pleno armazenamento como pela ação sísmica e fenómenos de esvaziamento rápido da albufeira que desencadeiam instabilidade no maciço estabilizador de montante (United States Society on Dams - Committee on Materials for Embankment Dams, 2011).

Visto que o fenómeno do esvaziamento rápido da albufeira se enquadra como uma das ações que originam instabilidade na estrutura levando ao possível colapso desta, e em particular do maciço estabilizador de montante, é imperativo conhecer melhor o fenómeno e as suas causas.

No presente capítulo será aprofundada a descrição do fenómeno do esvaziamento rápido em barragens de aterro e o porquê deste influenciar a segurança deste tipo de estrutura. Serão também apresentados fatores condicionantes que tornam a barragem de aterro mais ou menos estável nesta situação e possíveis métodos de controlo que melhorem o comportamento da mesma. Tendo presente os métodos de análise e a legislação Portuguesa vigente de barragens de aterro em situação de esvaziamento rápido, são apresentadas estas mesmas metodologias assim como discutidas algumas condicionantes e vantagens e desvantagens das mesmas.

2.2. Descrição e consequências do fenómeno

O fenómeno do esvaziamento rápido tem sido ao longo do tempo identificado com uma das situações mais críticas para a estabilidade a que um maciço estabilizador de montante de uma barragem de aterro pode estar submetido. Apesar de esta situação ser principalmente associada a maciços estabilizadores de montante de barragens de aterro, colapsos devido a este fenómeno são também comuns em taludes naturais ou construídos ao longo de rios e canais devido à inundação destes. Tal pode suceder devido à subida do nível de água provocado pela cheia, o nível de água mantém-se elevado durante um certo período de tempo sendo que quando o nível de água da cheia baixa, este processo acontece relativamente rápido. O efeito que esta alteração do nível de água de uma albufeira provoca numa barragem de aterro é essencial para compreender o fenómeno do esvaziamento rápido, deve ter-se em conta o que acontece ao solo não só em termos de resistência, mas também de dissipação ou não das pressões intersticiais que permanecem no seu interior (Kerkes e Fasset, 2006).

A dissipação das pressões intersticiais dentro do maciço é assim bastante importante. Se a dissipação da água nos solos que constituem a barragem de aterro não acompanhar a descida do nível de água da albufeira, o esvaziamento é considerado como rápido ou brusco (Berilgen,

2007). Assim, não é a velocidade do esvaziamento que leva a que este seja considerado rápido ou lento mas sim o facto de a dissipação das pressões intersticiais no maciço acompanharem, ou não, a descida do nível de água da albufeira.

Nesta situação, a estabilidade do maciço estabilizador de montante está condicionada tanto pela água que permanece no maciço, mas também principalmente pelo efeito estabilizador que a água da albufeira transmite, com forças que se opõem ao deslizamento, que deixa de se verificar após o esvaziamento (Vallejo et al., 2002).

Em relação à presença de água no maciço, esta é uma condicionante importante fundamentalmente devido à redução da resistência ao corte do solo ao diminuir a tensão efetiva como é explicitado nas equações 2.1 e 2.2.

$$\sigma'_n = \sigma_n - u \quad (2.1)$$

Quanto maior for a pressão intersticial, u , menor será a tensão efetiva, σ'_n e, consequentemente, e segundo o critério Mohr-Coulomb para um solo saturado, menor será a resistência ao corte, τ :

$$\tau = c + (\sigma_n - u)tg\phi' = c' + \sigma'_n tg\phi' \quad (2.2)$$

Com c correspondente à coesão e ϕ' ao ângulo de resistência ao corte na expressão 2.2. A presença de água no solo leva a que se mobilize uma menor resistência ao corte levando a que o maciço esteja mais próximo da rutura.

A presença da água no maciço estabilizador de montante provoca também o aumento do peso do material devido à saturação como se refere na equação 2.3.

$$\gamma = \gamma_d + S n \gamma_w \quad (2.3)$$

Com, γ a corresponder ao peso volúmico, γ_d ao peso volúmico seco, S ao grau de saturação, n à porosidade e γ_w ao peso volúmico da água. O aumento do peso do material origina a que as forças atuantes no maciço estabilizador sejam maiores tornando assim a sua estabilidade mais precária.

No entanto, como foi referido anteriormente, no estudo do esvaziamento rápido de uma barragem de aterro, o problema não reside apenas na água que permanece no maciço estabilizador de montante após o esvaziamento mas também pela perda do efeito estabilizador que a água da albufeira garante na situação de pleno armazenamento. Assim, resumidamente, e de forma esquemática, considere-se a evolução do nível freático num determinado maciço

estabilizador de montante para compreender melhor as consequências do fenómeno o esvaziamento rápido representado na Figura 2.2.

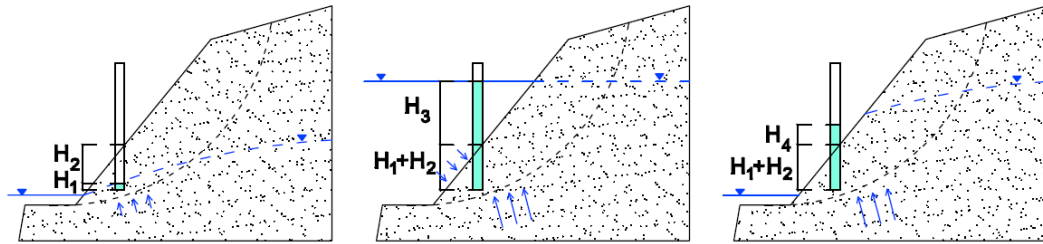


Figura 2.2 Evolução do nível de água num maciço estabilizador de montante genérico numa situação de esvaziamento rápido (adaptado de Vallejo et al., 2002)

Analisando uma determinada superfície de deslizamento, primeiramente, o maciço encontra-se em equilíbrio antes de ocorrer o enchimento da albufera registando-se uma altura H_1 da coluna de água num piezómetro genérico colocado no maciço. Seguidamente, é iniciado o enchimento e atingido o nível de pleno armazenamento da albufera sendo que nesta situação e visto que já se apresenta um nível freático constante no maciço estabilizador de montante o aumento das pressões intersticiais no terreno é contrabalançado pelo efeito que as forças estabilizadoras que a água da albufera transmitem sob a superfície do talude. O nível de água no piezómetro colocado no maciço nesta situação corresponde a $H_1+H_2+H_3$ que é igual ao nível de água da albufera. Finalmente, quando o nível da albufera desce as forças estabilizadoras deixam de existir mas poderão manter-se as elevadas pressões intersticiais no talude condicionando assim a estabilidade deste. A altura da coluna de água medida num piezómetro colocado num ponto genérico do maciço como ilustrado na Figura 2.2 evidencia bem esse facto. Comparando com a situação inicial, a altura H_1 registada inicialmente no piezómetro, corresponde a uma altura da coluna de água de $H_1+H_2+H_4$ na situação final, sendo que o nível de água da albufera é o mesmo para ambas as situações.

Para compreender melhor esta perda do efeito estabilizador garantido pela água da albufera, analise-se a Figura 2.3 que representa o estado de tensão e as respetivas alterações a que um determinado maciço estabilizador de montante de uma barragem de aterro está sujeito numa fase de esvaziamento da albufera.

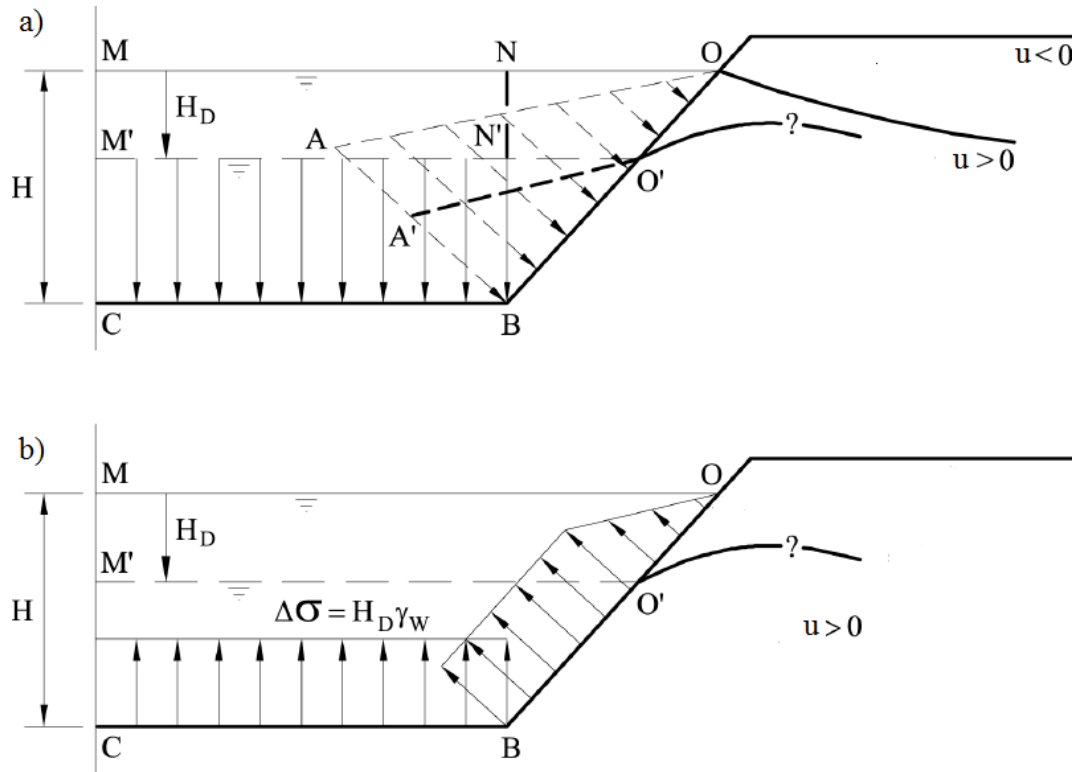


Figura 2.3 Efeito do rebaixamento do nível de água da albufeira num maciço estabilizador de montante com a) pressões hidrostáticas a atuarem inicialmente b) efeito da mudança de pressões hidrostáticas devido ao rebaixamento do nível de água da albufeira (adaptado de Pinyol et al., 2008)

Considere-se um esvaziamento correspondente a uma descida do nível de água de uma albufeira H_D de MO para M'O' ocorrendo uma mudança das pressões hidrostáticas a atuarem no maciço. Tal como é ilustrado na Figura 2.3 a), ao estado inicial OAB contra a superfície do maciço passa a verificar-se uma ação hidrostática correspondente a O'A'B e, por sua vez, na parte inferior à pressão hidrostática inicial correspondente a MNCB passará a verificar-se a distribuição M'N'CB devido ao rebaixamento do nível de água. Esta mudança do nível de água da albufeira origina assim a uma descompressão na base do talude em CB cuja grandeza é ilustrada na expressão 2.4 e na Figura 2.3 b).

$$\Delta\sigma = H_D * \gamma_w \quad (2.4)$$

Em que $\Delta\sigma$ corresponde à grandeza dessa mesma descompressão, H_D à altura da descida do nível de água da albufeira e γ_w ao peso volúmico da água. Para além desta descompressão na base também se verifica uma variação linear na superfície deste devido à mudança do nível freático como é observável na Figura 2.3 b).

Esta mudança das condições de fronteira causa assim uma nova distribuição de pressões hidrostáticas a atuarem na superfície do maciço sendo que esta mudança provoca também

alterações nas pressões intersticiais no interior deste. Se a dissipação da água no seu interior acompanhar a descida de água da albufeira não existirão problemas na estabilidade associados ao esvaziamento mas se tal não suceder a estabilidade do maciço poderá estar condicionada.

Para além da descompressão do maciço provocada pela perda do efeito estabilizador que a água da albufeira garante na situação de pleno armazenamento, que deixa de suceder após o esvaziamento da albufeira, forças essas que se opunham ao deslizamento, deve também ter-se em conta o efeito da água que permanece no maciço o que implicará uma menor estabilidade.

No entanto, é pouco comum que uma albufeira sofra uma descida total do seu nível de água mas, em casos especiais, o momento de maior instabilidade pode até nem estar associado a um esvaziamento total mas sim a um esvaziamento parcial da albufeira. O facto do pé do maciço estabilizador de montante estar submerso reduz a sua resistência e, juntamente com a ação do peso do solo saturado no maciço, torna a barragem de aterro ainda mais instável. Nesse caso, o método de análise ao esvaziamento rápido escolhido assume particular importância como se irá estudar no decorrer da presente dissertação (Singh e Varshney, 1995).

Considerando todos os aspetos apresentados anteriormente, o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) propõe assim um fator de segurança superior a 1,3 para uma situação de esvaziamento rápido. Mencionam-se também os fatores de segurança para outras duas situações críticas à estabilidade de uma barragem de aterro na Tabela 2.1 para termo de comparação.

Tabela 2.1 Fatores de segurança segundo a legislação Portuguesa (Portaria nº846/93, 1993)

Maciço condicionante	Situação	Fator de segurança
Jusante	Regime permanente	>1,5
Montante	Esvaziamento rápido	>1,3
Jusante e montante	Fase construtiva	>1,4

O facto do fator de segurança associado ao esvaziamento rápido ser o menor entre todas as ações consideradas críticas à estabilidade de uma barragem de aterro, está relacionado com as consequências da rotura de uma barragem de aterro nesta situação. Tendo em conta que, numa fase de esvaziamento, a massa de água armazenada na albufeira é reduzida, o possível colapso da barragem causa consequências menores que numa situação de pleno armazenamento, associada a um volume de água armazenado na albufeira maior.

Tendo sido descrito o esvaziamento rápido e o porquê deste condicionar a estabilidade de uma barragem de aterro, será agora importante estudar que fatores levam a uma maior ou menor estabilidade ao esvaziamento rápido de modo a compreender quais as situações mais críticas quando uma barragem de aterro se encontra sob a ação deste fenómeno.

2.3. Fatores condicionantes à estabilidade

Percebido o fenómeno do esvaziamento rápido analisem-se agora os fatores que influenciam uma maior ou menor estabilidade de uma barragem de aterro quando submetida a esse mesmo fenómeno. Podem-se referir três condicionantes fundamentais para a estabilidade do maciço estabilizador de montante de uma barragem de aterro em situação de esvaziamento rápido (Fell et al., 2005):

- mudança do nível de água da albufeira e a velocidade dessa alteração;
- tipo de material dos maciços estabilizadores e também do solo presente na fundação;
- geometria da barragem.

Em relação à mudança do nível de água da albufeira é importante aprofundar a importância das consequências da velocidade a que essa mudança decorre. De facto, se o esvaziamento for de tal maneira lento que permita que a dissipação das pressões intersticiais no maciço estabilizador de montante acompanhe o rebaixamento do nível da albufeira, não existirão problemas relacionados com a estabilidade pois é mantido um estado de equilíbrio entre a ação hidrostática na superfície do maciço e as pressões intersticiais no seu interior.

Poderia então ser feita uma relação linear entre a velocidade a que ocorre o esvaziamento da albufeira e a estabilidade da estrutura, ou seja, quanto mais rápida esta fosse mais instável seria a estrutura mas esta afirmação não é completamente correta. De facto, se o maciço estabilizador for muito permeável as consequências na estabilidade de uma velocidade maior ou menor para o abaixamento do nível de água da albufeira poderão ser pouco relevantes pois mesmo considerando uma velocidade de abaixamento elevada o maciço continuará a ter capacidade de escoar o excesso de pressões intersticiais com facilidade.

Em relação à velocidade que decorre o esvaziamento deve também referir-se que o momento de maior instabilidade poderá acontecer para níveis de água da albufeira mais elevados quanto mais lento for o esvaziamento. Ou seja, comparando dois esvaziamentos a velocidades diferentes, no caso do esvaziamento mais rápido, o fator de segurança mínimo associado a este poderá verificar-se para um nível de água da albufeira mais baixo, com uma consequente maior descida do nível de água, que para a velocidade mais lenta (Viratjandr e Michalowski, 2006).

Tendo presente as consequências que a velocidade de abaixamento da albufeira implica na estabilidade, já é possível perceber a influência do tipo de material da barragem e em particular da permeabilidade deste na estabilidade numa situação de esvaziamento rápido.

Refira-se que a permeabilidade na direção paralela à estratificação é geralmente bastante superior do que na direção perpendicular. Este aspeto assume particular importância no caso das barragens de aterro pois estas são compactadas em camadas horizontais apresentando-se estratificadas não só devido às diferenças de textura no solo mas também ao grau de compactação das diferentes camadas.

Assim, em relação ao tipo de material que constitui o maciço estabilizador de montante, e estando a permeabilidade relacionada com o modo como a água percola no solo, quanto mais permeável este for, maior facilidade existirá para que se dissipem as pressões intersticiais que permanecem no interior deste, permitindo assim que a estrutura seja mais estável (Pinyol et al., 2008).

Deve também estudar-se para além da permeabilidade do material do maciço estabilizador de montante, a relação das propriedades do material de fundação e neste caso em particular da sua permeabilidade, com a estabilidade de uma barragem de aterro. Convém em primeiro lugar ter presente que nenhuma fundação é impermeável mesmo que seja rochosa. De facto, a permeabilidade de um solo bem compactado (na ordem de 10^{-7} m/s a 10^{-9} m/s) pode até ser menor que a permeabilidade da maior parte de fundações rochosas (na ordem dos 1 a 100 lugeons que equivale a 10^{-7} m/s a 10^{-5} m/s) (Fell et al. 2005). Quando o material de fundação da barragem apresenta uma permeabilidade reduzida as linhas de percolação durante o esvaziamento assumem especial relevância pois ficarão dirigidas para montante da barragem o que tornará a estrutura menos estável tal como é ilustrado na Figura 2.4.

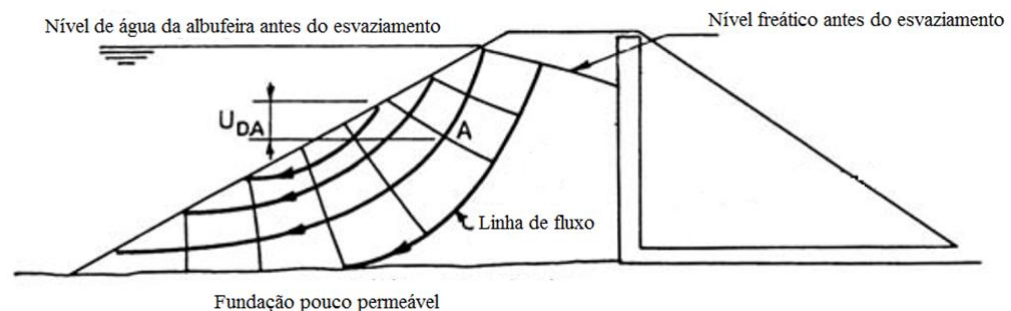


Figura 2.4 Esvaziamento de uma barragem de aterro numa fundação pouco permeável (adaptado de Fell et al., 2005)

Finalmente, relacione-se o efeito que a geometria da barragem de aterro, e a inclinação do seu maciço estabilizador em particular, com a estabilidade. O material que compõe um determinado talude tem tendência a escorregar sob a influência da gravidade, se as tensões atuantes forem maiores que a resistência ao corte do solo então o talude será menos estável. O aumento da inclinação de um talude provoca assim um incremento das tensões atuantes podendo provocar a rutura do mesmo (Gudicini e Nieble, 1984). Quer isto dizer que quando se

analisa a estabilidade de um determinado maciço estabilizador de montante de uma barragem de aterro quanto mais inclinado for mais instável este será.

Concluindo, os aspetos que influenciam a estabilidade ao esvaziamento rápido aqui apresentados serão estudados e confirmados no Capítulo 3, no qual será feita uma análise paramétrica onde serão testadas as variáveis aqui identificadas e averiguar qual a influência destas na estabilidade da estrutura.

2.4. Métodos de controlo do escoamento

O controlo do escoamento pode minimizar riscos associados a situações críticas à estabilidade de uma barragem de aterro. No presente capítulo referem-se métodos de drenagem que minimizam o risco de colapso apenas tendo em atenção o fenómeno do esvaziamento rápido da albufeira (Cedergren, 1989).

Em primeiro lugar, tendo em conta que a permeabilidade do material que constitui o maciço estabilizador de montante é uma condicionante importante, deve utilizar-se um solo o mais permeável possível disponível no local para a construção deste. Assim, o excesso de pressões intersticiais desenvolver-se-á no núcleo da barragem e, se este for estreito, o efeito que as pressões intersticiais que não se dissipam após o esvaziamento brusco da albufeira na estabilidade do maciço estabilizador de montante pode ser praticamente desprezado. Refira-se também que nem todos os solos muito permeáveis permitem que a água percole livremente no seu interior, no caso de areias siltosas ou cascalhos se os vazios destes estiverem preenchidos por solos arenosos ou siltosos poderão permanecer elevadas pressões intersticiais no maciço estabilizador de montante após o esvaziamento rápido da albufeira (Singh e Varshney, 1995).

Quando não existe a possibilidade de construir o maciço estabilizador de montante com materiais permeáveis devem então colocar-se elementos que permitam que o excesso de pressões intersticiais se dissipe mais facilmente como drenos. A inclusão de elementos de drenagem auxiliares na estrutura pode ser importante para facilitar o escoamento do excesso de pressões intersticiais que permanecem na estrutura sendo comum a inclusão destes no maciço estabilizador de jusante. A escolha de construir uma barragem de aterro com um dreno de chaminé revela-se uma solução bastante satisfatória para a dissipação de pressões intersticiais, sendo no entanto muito mais eficaz na dissipação da água no maciço estabilizador de jusante do que no de montante (Moayed et al., 2012).

No caso da drenagem do maciço estabilizador de montante, poderá ser incluído na sua base um tapete drenante com o comprimento que se achar conveniente. A água que permanece na

barragem será drenada para este tapete tornando as linhas de percolação praticamente verticais, em direção ao tapete drenante, em vez de se dirigirem para o maciço estabilizador de montante garantindo assim uma maior estabilidade da barragem de aterro. Depósitos de siltes no fundo da albufeira podem reduzir a eficácia desta solução, poderão congestionar a saída da água do dreno devendo este ser colocado à cota que se julgará que permanecerá o nível mínimo de água da albufeira, quando ocorre o esvaziamento, para uma solução mais adequada (Singh e Varshney, 1995).

Alternativamente, e também com especial relevância quando a barragem de aterro é construída numa fundação muito pouco permeável, outra das formas de atenuar ou solucionar o problema, utilizando o mesmo princípio, será a incorporação de drenos horizontais ao longo do maciço estabilizador de montante em vez da colocação de apenas um na sua base. O escoamento ao longo do maciço é facilitado, evitando mais uma vez que as linhas de fluxo fiquem dirigidas para montante, ou seja, na posição em que provocam uma maior instabilidade da barragem de aterro tal como é ilustrado na Figura 2.5.

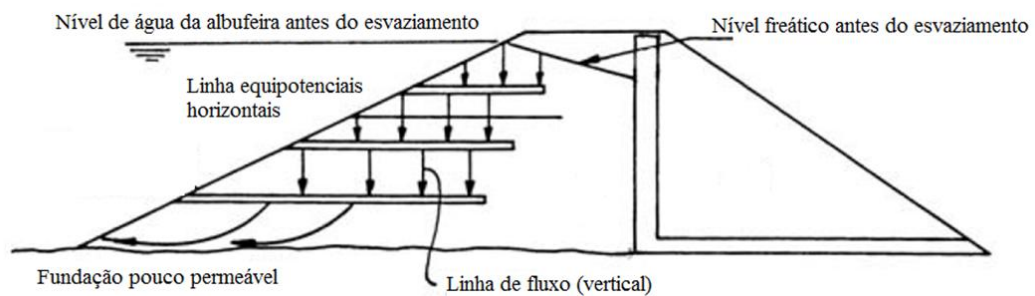


Figura 2.5 Esvaziamento com colocação de drenos horizontais (adaptado de Fell et al., 2005)

Para produzir o mesmo efeito que esta solução, e quando no local se dispõe de quantidades consideráveis de cascalhos arenosos, estes podem ser colocados no maciço estabilizador de montante com o objetivo de aumentar a estabilidade durante o esvaziamento. A espessura desta nova camada terá que ser substancialmente maior que a camada de proteção geralmente dimensionada para a proteção do paramento montante à ação das vagas e da erosão interna causada pelo esvaziamento (Maranha das Neves, 1975).

2.5. Métodos de avaliação de estabilidade

2.5.1. Considerações gerais

Para que a segurança de uma barragem de aterro esteja salvaguardada ao esvaziamento rápido da albufeira, será necessário que esta situação esteja prevista quando se faz o dimensionamento da barragem. Existe assim a necessidade de respeitar um conjunto de normas e regulamentações pelo projetista sendo de destacar a nível nacional o RSB.

Este regulamento aplica-se a barragens com alturas superiores a 15 metros ou para albufeiras que armazenem mais de 1000000 m³ sendo que também engloba barragens com mais de 10 metros que armazenem volumes superiores a 100000 m³ (Decreto-lei nº 344/2007, 2007). Na presente dissertação apenas se irão referir elementos desta regulamentação relativos ao esvaziamento rápido da albufeira. Associados ao RSB estão três documentos que também são importantes mencionar, as normas de projeto de barragens, normas de construção de barragens e, finalmente, as normas de observação e inspeção de barragens.

Em relação ao esvaziamento rápido o artigo nº47 das normas de projeto de barragens estabelece que devem ser respeitados fatores de segurança de 1,3 ao deslizamento utilizando métodos de equilíbrio limite na análise da situação de esvaziamento rápido (Portaria nº846/93, 1993). Menciona-se assim na presente dissertação um dos métodos de análise ao esvaziamento rápido, o método de equilíbrio limite.

Os métodos de equilíbrio limite têm sido amplamente utilizados para análise de estabilidade de taludes devido à simplicidade matemática com que são formulados aplicando estes um critério de rotura Mohr-Coulomb. Consistem numa análise numérica estática considerando uma determinada massa de solo em equilíbrio e fazendo esta depender de três equações de equilíbrio (Hammouri et al., 2008).

Existem no entanto casos documentados que ilustram as limitações de uma análise segundo este método. No caso dos taludes da margem do rio Carrot no Canadá, para uma situação de esvaziamento rápido, e através do dimensionamento recorrendo a métodos de equilíbrio limite, era prevista uma descida do fator de segurança de 1,0 para 0,65. Uma cheia em 1995, seguida de uma descida rápida do nível de água do rio, permitiu averiguar se os pressupostos eram os corretos. Foram registados os dados medidos nos piezómetros instalados nos taludes assim com as deformações nos inclinómetros, não se tendo verificado uma descida tão acentuada do fator de segurança (Pauls et al., 2011). Este caso permite ter uma ideia das limitações do estudo de uma situação de esvaziamento rápido segundo um método de equilíbrio limite podendo ser útil

uma análise segundo outro método, em particular a utilização de ferramentas que utilizem o método dos elementos finitos.

No presente capítulo serão assim estudados três métodos para avaliação da estabilidade numa situação de esvaziamento rápido. Duas propostas utilizando métodos de equilíbrio limite, sendo a primeira os ábacos de Morgenstern, um método simplificado que serve para o cálculo da estabilidade em situação de esvaziamento rápido, e uma abordagem desenvolvida por Wright e Duncan (2003) que ultrapassa algumas das limitações associadas aos ábacos de Morgenstern. Finalmente, serão descritas algumas particularidades da análise ao esvaziamento rápido com o programa Plaxis 2D que utiliza o método dos elementos finitos.

2.5.2. Ábacos de Morgenstern

Os ábacos de Morgenstern servem para facilitar o cálculo do fator de segurança de um determinado maciço estabilizador durante o esvaziamento rápido, sendo umas das primeiras abordagens para este cálculo utilizando um método de equilíbrio limite. Assumem como pressupostos que a barragem é homogênea ou seja construída com um único material, fundada sob um estrato rígido e impermeável, e utilizam-se parâmetros de resistência dos solos em termos de tensões efetivas, c' e ϕ' .

Apesar das limitações destes para o dimensionamento de barragens de aterro com uma estrutura mais complexa, constituídas por mais do que um tipo de material, estes ábacos relacionam o fator de segurança com a inclinação do maciço, nível de descida da água da albufeira e parâmetros de resistência do solo como o ângulo de atrito interno e a sua coesão, tendo sido alguns destes aspetos identificados como condicionantes importantes na estabilidade nesta situação (Morgenstern, 1963). Apresenta-se a Figura 2.6 que trata de um exemplo dos ábacos que aqui se referem.

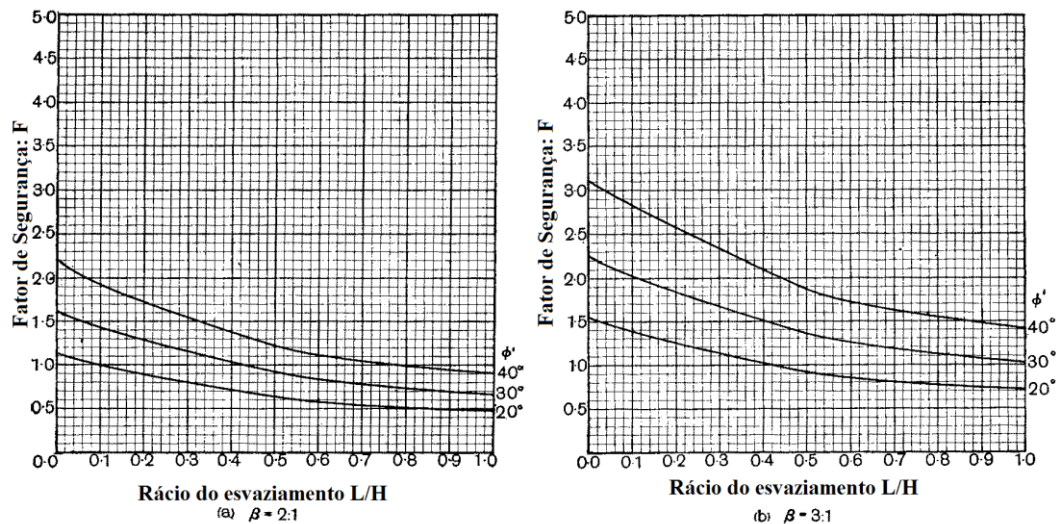


Figura 2.6 Ábacos de Morgenstern com $\frac{c'}{\gamma \cdot H} = 0,025$ (adaptado de Morgenstern, 1963)

Como se pode observar pela Figura 2.6, para uma maior inclinação de 2:1 (H:V) em relação a 3:1 (H:V), os fatores de segurança calculados são menores sendo que para a descida do nível de água de albufera (L) em relação à altura da barragem (H) o fator de segurança obtido é tanto menor quanto maior for a descida. Estes aspetos não só confirmam o que foi analisado na presente dissertação em relação aos fatores que influenciam a estabilidade em situação de esvaziamento rápido, como permitem ter uma pequena noção de um método simplificado para o dimensionamento numa situação de esvaziamento rápido pois através destas condicionantes obtém-se um valor do fator de segurança associado ao esvaziamento.

No entanto, este método é bastante limitativo para análise de barragens de aterro de perfil zonado, não só porque a estrutura destas é bastante mais complexa que as barragens homogêneas, mas também porque apenas considera esvaziamentos totais da albufera e não esvaziamentos parciais que podem ser condicionantes importantes para a estabilidade da estrutura como se referiu anteriormente. Não é também tido em conta o tempo que o esvaziamento demora sendo que essa pode já ser identificada como uma condicionante importante na análise ao esvaziamento segundo um método de equilíbrio limite.

Esta abordagem pode então ser inserida num dos grupos de análise ao esvaziamento rápido que analisa primeiro as pressões intersticiais e que interpreta a resistência do solo independente do esvaziamento rápido, ignorando o efeito da consolidação na resistência ao corte do solo ao contrário de outras metodologias mais modernas que também utilizam métodos de equilíbrio limite na análise do esvaziamento rápido (Viratjandr e Michalowski, 2006). Apresenta-se de seguida uma proposta que ultrapassa algumas destas limitações desenvolvida por Wright e Duncan (2003), sendo que também se baseia num método de equilíbrio limite.

2.5.3. Método de equilíbrio limite

Tal como referido anteriormente, os ábacos de Morgenstern são obtidos através de uma análise através de métodos de equilíbrio limite. As simplificações assumidas para a elaboração destes ábacos não permitem que os resultados que estes fornecem sejam aplicados em muitas situações. Assim, houve a necessidade de desenvolver uma metodologia o mais completa possível que permitisse efetuar um correto dimensionamento ao esvaziamento rápido utilizando também métodos de equilíbrio limite. Os métodos de equilíbrio limite convencionais têm sido bastante utilizados ao longo do tempo no ramo da geotecnia sendo que o método que aqui se apresenta de análise ao esvaziamento rápido apresenta algumas alterações em relação à metodologia clássica.

Wright e Duncan (2003) compilaram dois métodos, um deles desenvolvido por Lowe e Karafiath em 1959, e outro mais tarde pela *U.S. Army Corps of Engineers (USACE)* em 1970 para análise de estabilidade segundo um método de equilíbrio limite de uma barragem de aterro em situação de esvaziamento rápido. Este método consiste em realizar dois ou por vezes três cálculos de estabilidade para cada superfície de deslizamento em estudo.

O objetivo da primeira fase de cálculos será determinar as tensões efetivas e tensões de corte do solo, antes do esvaziamento ocorrer, considerando uma determinada superfície de deslizamento. Os parâmetros intrínsecos do solo assumidos assim como as pressões intersticiais são as mesmas que são adotadas para uma situação de regime permanente, ou seja, com a albufeira cheia. Por sua vez, os parâmetros de resistência ao corte são obtidos através de ensaios consolidados não drenados (CU) com medição de pressões intersticiais ou então a partir de ensaios consolidados drenados (CD).

Depois de serem calculadas as tensões efetivas e tensões de corte, será necessário relacionar estas com a resistência ao corte do solo, para tal, é estabelecida a envolvente de rotura presente na Figura 2.7.

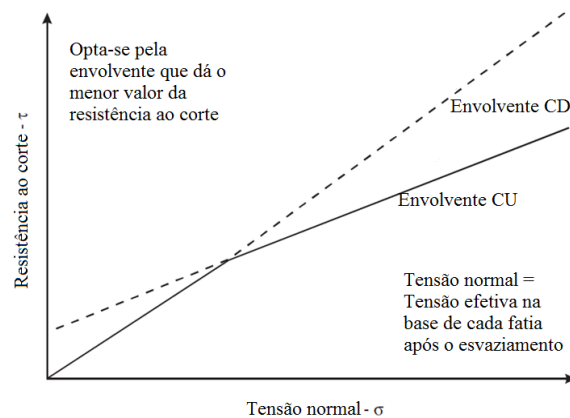


Figura 2.7 Envolvente a considerar na análise do esvaziamento rápido (Wright e Duncan, 2003)

Através desta envolvente será agora possível relacionar a tensão efetiva calculada anteriormente com a resistência ao corte do solo. É utilizada esta envolvente de rotura composta com outras duas envolventes de modo a que o valor da resistência ao corte atribuído seja mínimo.

Calculada a resistência ao corte, uma terceira fase de cálculos servirá para calcular a estabilidade imediatamente após ocorrer o esvaziamento rápido assumindo que todos os materiais que sejam pouco permeáveis apresentam comportamento não drenado.

Materiais cuja drenagem ocorra livremente, ou seja, que apresentem uma maior permeabilidade são utilizados parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas. Deverá também ser feita uma última referência ao modo como as pressões intersticiais são obtidas. Para materiais cuja drenagem ocorra livremente, a pressão intersticial deve ser representativa de um estado em que já se estabeleceu um novo regime permanente mas em que o nível do reservatório deixou de ser o que considerava a albufeira no seu nível original, mas sim no nível em que este fica após o esvaziamento. No caso de materiais menos permeáveis, em que a drenagem da água nestes não ocorre livremente, consideram-se os cálculos em termos de tensões totais.

Com base nestes princípios é calculado um fator de segurança que satisfaça o equilíbrio como é feito no procedimento de uma análise de equilíbrio limite clássica. Terminados os cálculos de estabilidade, será importante avaliar para cada fatia arbitrada na superfície de deslizamento inicial se a resistência ao corte é maior ou menor que a resistência ao corte não drenada, e averiguar se serão necessários novos cálculos de estabilidade. A resistência ao corte na base de cada fatia será calculada recorrendo a equação utilizada para o cálculo das tensões totais na primeira fase de cálculos, mas calculada agora relativamente à segunda fase, ou seja, imediatamente após o esvaziamento rápido ter ocorrido. Quanto à pressão intersticial, esta

corresponderá a uma fase em que um novo regime estacionário se estabeleceu, ou seja, o nível da albufera desceu e permanecerá constante no nível que apresenta após o esvaziamento. A resistência ao corte poderá ser agora obtida utilizando as tensões efetivas calculadas e os parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas do solo c' e ϕ' , os mesmos que foram utilizados na primeira fase de cálculos.

Compara-se a resistência ao corte calculada com a resistência ao corte não drenada obtida na primeira fase de cálculos para cada fatia. Se a resistência ao corte for maior que a resistência ao corte não drenada em todas as fatias então, não serão necessários mais cálculos e o fator de estabilidade relativo ao esvaziamento rápido foi bem calculado. No entanto, se a resistência ao corte em alguma fatia for menor que a resistência ao corte não drenada, terá que ser realizada uma nova fase de cálculos de estabilidade.

Para essas fatias de solo, onde a resistência ao corte do solo é menor que a resistência ao corte não drenada do mesmo, são utilizados os parâmetros de resistência do solo c' e ϕ' para a próxima fase de cálculos. Em relação à resistência ao corte, em vez de se utilizar a resistência ao corte não drenada na última fase de cálculos, utilizar-se-á a resistência ao corte calculada para essa fatia.

Tendo presente esta particularidade do método de cálculo, são realizados novos cálculos de estabilidade tendo em conta as fatias cuja resistência ao corte obtida foi menor que a resistência ao corte não drenada. Obtém-se assim um fator de segurança mais realista em relação à estabilidade de uma barragem de aterro ao fenómeno do esvaziamento rápido.

Para conhecer a superfície de rotura crítica, e o fator de segurança mínimo, seria necessário repetir o processo mas arbitrando várias novas superfícies de deslizamento diferentes da considerada inicialmente (Wright e Duncan, 2003).

Este método de cálculo apresenta assim algumas vantagens. Em primeiro lugar utiliza os parâmetros de resistência em relação a tensões efetivas quando estes são menores que os que se referem aos parâmetros de resistência não drenada em zonas que estão geralmente submersas na albufera, sendo este princípio recomendado pela *U.S. Bureau of Reclamation (USBR)*, *USACE* e Duncan. Esta assunção permitirá ter em conta a fissuração, dilatação e o amolecimento do maciço que pode ocorrer devido não só à construção mas também após repetidos esvaziamentos (Fell et al., 2005).

Em relação às tensões efetivas, estas servem para estimar a resistência após o esvaziamento. Tal processo é também recomendado por Duncan et al. (1990) pois estes demonstraram que a utilização de parâmetros de resistência em relação às tensões efetivas apenas para a situação

antes do esvaziamento acontecer como sugerido pela *USACE* e *USB* era um pressuposto demasiado conservativo (Fell et al., 2005).

Finalmente, ao considerar parâmetros de resistência não drenada acima do nível máximo de água da albufeira para descrever o comportamento dos solos, e devido ao facto dos parâmetros em termos de tensões efetiva nestes locais subestimarem a verdadeira resistência deste solo parcialmente saturado, é possível ter uma boa aproximação ao comportamento dos solos acima do nível da água pois, caso contrário, estes seriam considerados de fraca resistência (Fell et al., 2005).

No entanto, é importante salientar que este método foi desenvolvido quando o recurso a *software* no cálculo geotécnico era bastante reduzido apresentando as seguintes limitações (Fredlund et al., 2010):

- o tempo que demora o esvaziamento não é tido em conta no cálculo;
- o método assume que os ensaios laboratoriais CU representam as condições limite ao longo de toda a superfície de deslizamento. No entanto, a assunção de um único valor para a resistência ao corte não drenada ao longo de toda a superfície de deslizamento não é um pressuposto realista (Kerkes e Fassett, 2006);
- a determinação de um valor para a resistência ao corte não drenada pode revelar-se de bastante dificuldade (Kerkes e Fassett, 2006);
- a localização da superfície de deslizamento não muda durante o esvaziamento rápido.

No caso de barragens de aterro, se os fatores de segurança calculados forem superiores a 1,5, não existirá qualquer risco de segurança da obra não sendo a análise de estabilidade por outro método de cálculo de particular interesse. No entanto, se se pretenderem reduzir os custos do empreendimento, ou se o fator de segurança associado ao esvaziamento rápido for inferior a 1,5, a análise com uma ferramenta que utilize o método dos elementos finitos pode ser importante, análise essa que se apresenta seguidamente.

Concluindo, na análise da estabilidade de uma barragem de terra segundo este método, é arbitrada uma superfície de deslizamento e estabelecida uma estimativa quantitativa para essa mesma superfície examinando-se as condições de equilíbrio e os esforços necessários para que este se mantenha. Este procedimento permite ter uma ideia do coeficiente de segurança mas não fornece qualquer tipo de informação em relação às deformações da estrutura.

No entanto, estes dados são importantes para a análise dos fenómenos de erosão que resultam de assentamentos diferentes entre as várias secções da barragem assim como

fenómenos de fratura hidráulica provocado pelos diferentes graus de compressibilidade entre as zonas do núcleo e do maciço da barragem de terra. Assim, a utilização de um programa de cálculo que utilize o método dos elementos finitos que se apresenta seguidamente poderá ser de grande utilidade em vez de um análise utilizando apenas métodos de equilíbrio limite.

2.5.4. Método dos elementos finitos

A introdução do método dos elementos finitos na resolução de problemas geotécnicos foi feita pela primeira vez por Clough e Woodward em 1967, analisando o comportamento de uma barragem de terra utilizando uma lei constitutiva não linear. Esta análise evidenciou logo um grande potencial principalmente por permitir incorporar as relações tensão/deformação de diferentes tipos de solo que compõem o maciço, evitando a assunção de hipóteses simplificadoras que caracterizavam os métodos de equilíbrio limite.

O programa Plaxis 2D, utilizado na presente dissertação, utiliza o método dos elementos finitos para a resolução de problemas na engenharia geotécnica. Inclui o módulo 2D *Plax Flow* para a análise não só de deformações mas também problemas relacionados com a estabilidade de estruturas geotécnicas. Este tipo de estruturas requer avançados modelos constitutivos para a simulação do seu comportamento não linear, dependente de variáveis como o tempo e tendo também em conta a sua anisotropia pois estão presentes materiais como solos ou rochas. Reconhecendo a noção do solo como um material que apresenta diferentes fases são necessários também cuidados especiais de modo a lidar com as pressões intersticiais presentes neste.

Para analisar o comportamento mecânico de solos saturados ou parcialmente saturados através de métodos numéricos como o método dos elementos finitos é necessário ter em conta tanto a deformação do solo como a percolação da água no seu interior. No caso de escoamentos em que uma das variáveis seja o tempo estas equações terão de ser resolvidas simultaneamente.

Podem-se distinguir assim dois tipos de análise de estabilidade de taludes através de ferramentas que utilizem o método dos elementos finitos submetidos a regimes de escoamento variáveis como é o caso de maciços estabilizadores de montante de barragens de aterro em fase de esvaziamento rápido da albufeira.

Na primeira, o escoamento e as deformações são analisados separadamente. As pressões intersticiais previstas para cada momento durante o esvaziamento, podem ser depois utilizadas como pressupostos a considerar na análise de deslocamentos com recurso ao método dos elementos finitos através de uma metodologia comumente designada por *shear strenght reduction technique* em termos de tensões efetivas (Huang e Jia, 2009). Simplificadamente, esta

metodologia consiste em reduzir incrementalmente os parâmetros do solo c' e $tg\phi'$ em sucessivas análises até que se verifique a falta de convergência no processo de cálculo, que corresponderá à rotura, calculando um fator de segurança que relacione a resistência ao corte máxima com a resistência mobilizada.

O outro método, e será este o utilizado na presente dissertação, realiza uma análise de estabilidade acoplada entre deformações e percolação. Tal facto significa que a *shear strenght reduction technique* é usada em combinação com a teoria de consolidação definida para solos não saturados. Esta abordagem apesar de mais realista origina computações mais complexas levando a que os cálculos demorem mais tempo a ser efetuados o que pode ser importante se se estiver a analisar uma malha de elementos finitos muito refinada (Huang e Jia, 2009).

Esta segunda abordagem torna possível avaliar as mudanças nas condições de fronteira (alteração do nível de água da albufeira) e a dissipação das pressões intersticiais no maciço simultaneamente sendo que, se a permeabilidade do solo for de tal modo elevada que permita que a dissipação ocorra praticamente instantaneamente, a primeira abordagem fornece também ela resultados satisfatórios. Numa análise não acoplada, quando o esvaziamento se inicia, as pressões intersticiais serão maiores que no caso de uma análise acoplada pois essa abordagem não tem em consideração as mudanças a que o maciço estabilizador está sujeito em termos de tensões logo imediatamente após o esvaziamento se iniciar (Pinyol et al., 2008).

Assim, podem-se referir como principais vantagens desta abordagem acoplada na avaliação de estabilidade ao esvaziamento rápido a possibilidade de ter em conta as mudanças das pressões intersticiais no maciço devido à mudança das condições de fronteira e também devido ao novo regime de escoamento que se gera também devido a esta situação. Assumindo que se efetua uma análise deste tipo a dissipação das pressões intersticiais dependerá da estrutura do solo considerado (Pinyol et al., 2008). Esta análise acoplada constitui assim uma boa aproximação para avaliação de uma situação de esvaziamento rápido de uma barragem de aterro.

O módulo 2D *Plax Flow*, incorporado no programa, será então uma componente fundamental para o desenvolvimento da presente dissertação. Permite resolver situações em que o regime de escoamento é variável e lidar com equações que resolvem simultaneamente deslocamentos e pressões intersticiais, sendo esta abordagem de cálculo conhecida comumente como análise acoplada (Reference Manual for Plaxis 2D, 2010).

Para além da possibilidade de efetuar este tipo de análise acoplada, é importante estabelecer a maneira como são obtidos os fatores de segurança (FS) no programa Plaxis 2D. Geralmente, o fator de segurança é definido como sendo a razão entre a carga de colapso e a carga de serviço

no entanto, no ramo da geotecnia, esta definição poderá ser considerada bastante limitativa principalmente porque neste tipo de estruturas um aumento do peso do solo não implicará necessariamente o colapso. Assim, o coeficiente de segurança é definido como sendo:

$$FS = \frac{\text{Força de Corte Máxima}}{\text{Força de Corte Necessária para o Equilíbrio}} \quad (2.5)$$

Introduzindo a hipótese de Coulomb obtém-se a seguinte condição:

$$FS = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{c_r + \sigma_n * \tan \phi_r} \quad (2.6)$$

Onde c e ϕ correspondem aos parâmetros de resistência e σ_n a componente normal dos esforços. Por sua vez c_r e ϕ_r correspondem aos mesmo parâmetros mas com valores suficientemente altos para que possa ser mantido o equilíbrio. No entanto, pode-se reduzir a coesão e tangente do ângulo de atrito na mesma proporção resultando a expressão que o programa Plaxis 2D irá utilizar para calcular o fator de segurança.

$$\sum M_{sf} = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} \quad (2.7)$$

O fator de segurança será definido como o valor do $\sum M_{sf}$ na rotura ou seja, quando este assume um valor constante para um certo número de patamares de carga (Reference Manual for Plaxis 2D, 2010). Estes fatores de segurança assumirão particular importância nos capítulos três e quatro da presente dissertação.

Finalmente, o programa computacional Plaxis 2D permite também efetuar os cálculos segundo dois modos de cálculo sendo que será útil estabelecer as diferenças entre estes. O *classical mode* segue a definição de Terzaghi para o cálculo das tensões totais:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.8)$$

Por sua vez, o *advanced mode*, baseia-se na definição de Bishop para o cálculo das tensões totais:

$$\sigma = \sigma' + S * u \quad (2.9)$$

Existe uma distinção entre a tensão efetiva e a pressão intersticial como na hipótese de Terzaghi mas é introduzido um novo parâmetro S , a sucção. Comumente os espaços entre as partículas do solo são preenchidos por alguma quantidade de água, quando se atinge um grau de saturação de 100% o solo diz-se saturado pois todos os seus poros estão preenchidos com água. No caso de um escoamento que ocorra dentro de um solo a água poderá ser retida ou absorvida

por este sendo que para desprender esta água absorvida, será necessária a aplicação de uma força cuja energia aplicada por volume de água se designará por sucção (Lee et. al, 1983).

Em relação à hipótese proposta por Terzaghi segundo Lee et al. (1983) esta, apesar da sua simplicidade, revela-se como uma excelente aproximação da realidade para solos saturados sendo que, no caso de solos não saturados, e por estes possuírem nos vazios tanto ar como água a diferentes pressões apresenta algumas limitações.

Assim, a hipótese de Bishop para o cálculo do estado de tensão para solos não saturados, tem como objetivo reformular o princípio das tensões efetivas proposto por Terzaghi com a inclusão de um parâmetro que represente a influência da sucção na tensão efetiva dos solos (Lu e Likos, 2006).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.10)$$

Com,

$(\sigma - u_a)$ - Tensão normal líquida;

$(u_a - u_w)$ - Sucção Mátrica;

χ - Porção da secção com água;

Para o caso de um solo saturado o parâmetro χ será igual a 1, no caso de um solo seco assumirá o valor zero sendo que, no caso de solos não saturados, este será dado em função do grau de saturação e de outros parâmetros como o tamanho das partículas, forma destas ou até mesmo o estado de tensão inicial do solo.

Não alheio ao facto deste parâmetro depender de diferentes variáveis, existem bastantes dificuldades na sua determinação experimental ou na sua estimação teoricamente limitando assim a aplicabilidade da proposta de Bishop (Lu e Likos, 2006).

Tendo em conta que na presente dissertação será analisada a estabilidade do maciço estabilizador de montante e, visto não só que este se encontra totalmente saturado assim como existe uma maior prática no cálculo do estado de tensão do solo através da hipótese admitida por Terzaghi, os cálculos no terceiro capítulo referente à análise paramétrica serão feitos segundo o *classical mode*.

No quarto capítulo em que é feita a análise do caso do projeto de uma barragem de aterro real, a barragem de Alcobertas, serão feitos os cálculos tanto segundo o *classical mode* como pelo *advanced mode* de modo a confirmar se os resultados obtidos são semelhantes e se mais uma vez pode ser desprezado o efeito da sucção na análise da estabilidade do maciço estabilizador de montante.

Capítulo 3

Análise paramétrica: Fatores que influenciam a estabilidade ao esvaziamento rápido

3.1. Introdução

Descrito o fenómeno do esvaziamento rápido e a importância que este assume na avaliação da segurança de uma barragem de aterro, assim como os métodos utilizados para a análise de estabilidade considerando este fenómeno, procura-se em seguida confirmar de que modo os vários fatores identificados previamente condicionam a estabilidade de uma barragem de aterro em fase de esvaziamento rápido.

Distinguem-se fatores como a permeabilidade do material que constitui o maciço estabilizador de montante, assim como a relação entre o coeficiente de permeabilidade horizontal com o coeficiente de permeabilidade na direção vertical (k_h/k_v), a velocidade a que o abaixamento do nível de água da albufeira se processa e a inclinação do maciço estabilizador de montante da barragem de aterro.

Procura-se através de uma análise paramétrica identificar e analisar estas condicionantes à estabilidade em situação de esvaziamento rápido variando a inclinação do paramento e os

coeficientes de permeabilidade do material do maciço estabilizador de montante assim como as velocidades de abaixamento da albufeira, e identificam-se as alterações do fator de segurança.

Finalmente, analisa-se também a evolução do fator de segurança à medida que o abaixamento do nível de água da albufeira decorre. Assim, procura-se conhecer quando é obtido o menor fator de segurança associado ao esvaziamento rápido, ou seja, se este assume o menor valor no final do esvaziamento ou numa fase intermédia.

No presente capítulo são avaliadas estas condicionantes sendo que será importante destacar que os fatores de segurança apresentados, referem-se sempre à estabilidade do maciço estabilizador de montante pois é a estabilidade deste que é condicionada pelo fenómeno em estudo, o esvaziamento rápido.

3.2. Descrição do modelo em estudo

3.2.1. Características dos materiais

Com o objetivo identificado de testar os fatores que influenciam a estabilidade numa situação de esvaziamento rápido de uma barragem de aterro, foi necessário definir um modelo que permitisse estudar as variáveis pretendidas. Optou-se por efetuar uma análise paramétrica utilizando dados obtidos para caracterização dos aterros da barragem de Alcobertas, assim os solos presentes referem-se a uma situação real, podendo os resultados ser de maior interesse. Uma nota, no entanto, para os parâmetros atribuídos ao material da fundação em que não foram considerados os dados obtidos pelo plano de prospeção mas sim definidos valores suficientemente altos para que a estabilidade da estrutura fosse apenas condicionada pelo aterro. Foram identificados quatro tipos diferentes de materiais, um para o núcleo da barragem, outro para os maciços estabilizadores, outro para o filtro e, finalmente, outro tipo de material para a sua fundação.

Para avaliar os parâmetros característicos dos solos em estudo seguiram-se os dados dos ensaios obtidos pelo plano de prospeção geotécnica entre eles análises granulométricas, ensaios Proctor e ensaios triaxiais mas tendo em atenção se estes eram coerentes com o problema em análise. Por exemplo, em relação ao valor assumido para a permeabilidade de cada um dos materiais, será lógico que o núcleo apresente uma permeabilidade de uma ordem de grandeza inferior que o restante solo que constitui a barragem para um bom desempenho desta. O módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson dos materiais presentes na barragem foram

também eles estimados com base nos resultados dos trabalhos de prospeção geológico-geotécnicos efetuados mas tendo também presente elementos bibliográficos.

Por sua vez, quanto ao comportamento dos diferentes solos assumiu-se que o núcleo apresentava comportamento não drenado e os restantes comportamento drenado. Tal significa que para o núcleo a água não percola através dos vazios sendo aceite este tipo de comportamento para um material de permeabilidade baixa, por sua vez, para os restantes solos que constituem o elemento em estudo, considera-se que estes possuem uma permeabilidade elevada que permite que para o intervalo de tempo de aplicação de um determinado carregamento se dissipe o aumento ou diminuição da pressão intersticial ou seja, considera-se o seu comportamento como drenado. Este modelo de comportamento em que se considera o núcleo com um comportamento não drenado, e os restantes solos com comportamento drenado, é também ele utilizado num dos exemplos do manual do programa Plaxis 2D (Reference Manual for Plaxis 2D, 2010). Para facilitar a leitura das propriedades dos materiais observe-se a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Propriedades dos materiais

	Fundação	Filtro	Maciço	Núcleo
γ (kN/m ³)	25	19	21	20
γ_{sat} (kN/m ³)	26	19	21,5	21
k_h (m/s)	9E-08	3E-03	5E-06	1E-08
k_v (m/s)	9E-08	3E-03	1E-06	2E-09
k_h/k_v	1	1	5	5
E_{ref} (MPa)	100	15	40	25
ν	0,3	0,35	0,2	0,3
c' (kPa)	400	1	10	13,1
ϕ' (°)	35	35	30	28
Comportamento	Drenado	Drenado	Drenado	Não Drenado

3.2.2. Modelo de cálculo

Tendo presente os materiais definidos para a barragem de aterro em estudo, a estrutura será modelada no programa Plaxis 2D, cujos princípios teóricos foram explicitados anteriormente, de modo a ser efetuada a análise paramétrica pretendida. Consideraram-se as dimensões da barragem de aterro as obtidas através do pré-dimensionamento desta que são apresentadas na Figura 3.1.

impermeável na base e nas laterais do modelo para que o escoamento decorra apenas através da barragem.

3.2.3. Cálculos

Antes de se apresentarem os resultados obtidos na análise paramétrica efetuada será importante referir algumas particularidades que se assumiram nos cálculos efetuados tais como os modelos de análise utilizados ou algumas das suposições assumidas nas diversas fases de cálculo inseridas no programa Plaxis 2D.

Em primeiro lugar, refira-se que se optou pela análise segundo o modelo Mohr-Coulomb. O estudo será feito segundo este modelo pois para além de existir maior experiência na utilização deste a sua simplicidade é ideal para compreender aspetos básicos do comportamento do solo. No entanto, convém ter presente que a sua simplicidade oferece também algumas limitações pois alguns aspetos importantes do comportamento do solo não são considerados. O modelo Mohr-Coulomb necessita que sejam introduzidos cinco parâmetros para caracterizar o solo no programa Plaxis 2D, o seu módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, ângulo de atrito interno, coesão e ângulo de dilatação (Reference Manual for Plaxis 2D, 2010).

Em relação à capacidade do solo para a retenção de água, ou seja a sua curva de retenção, que permite uma correta descrição do fluxo de água através do mesmo optou-se por utilizar o modelo de Van Genuchten para todos os solos presentes seguindo mais uma vez o exemplo do manual do programa Plaxis 2D.

Quanto às fases de cálculo deve também ser feita aqui uma referência. Antes de analisar o esvaziamento rápido da albufera modelou-se uma fase de cálculo designada por carregamento gravítico de modo a simular a situação em que a barragem se encontra na situação de pleno armazenamento ou seja, com o nível de água da albufera constante a uma cota alta durante um longo período de tempo. Para restaurar o equilíbrio na barragem de aterro devido às forças aplicadas na fase do carregamento gravítico foi também modelada uma fase zero que precederá o esvaziamento rápido da albufera em que não são acrescentadas cargas nem alterado o nível da água. As restantes fases de esvaziamento foram modeladas segundo o modelo *Consolidation EPP* em que é feita uma análise acoplada do escoamento e deformação como foi referido no Capítulo 2 da presente dissertação. A análise paramétrica foi toda ela realizada segundo o *classical mode* que segue a definição de Terzaghi para o cálculo das tensões totais pelos motivos também eles explicitados no Capítulo 2.

Finalmente, deve mencionar-se um dos aspetos que se selecionou no programa Plaxis 2D. Em todas as análises de esvaziamento da albufera selecionou-se a opção *reset displacements to*

zero de todas as fases de cálculo anteriores, ou seja, apenas se estão a considerar os deslocamentos provocados pelo esvaziamento e não pelo esvaziamento e fases de cálculo anteriores como o enchimento da albufeira. Tendo presentes todos estes aspetos já se poderão analisar convenientemente os resultados que se apresentam seguidamente.

3.3. Permeabilidade

Inicie-se a análise paramétrica considerando diferentes coeficientes de permeabilidade na direção horizontal para o maciço estabilizador da barragem em estudo mantendo a relação $k_h/k_v = 5$. Registe-se a evolução do fator de segurança com o aumento da permeabilidade para uma velocidade de esvaziamento de 17m/dia ou seja, que o esvaziamento total da albufeira decorre num dia apresentando-se essa mesma relação na Figura 3.3.

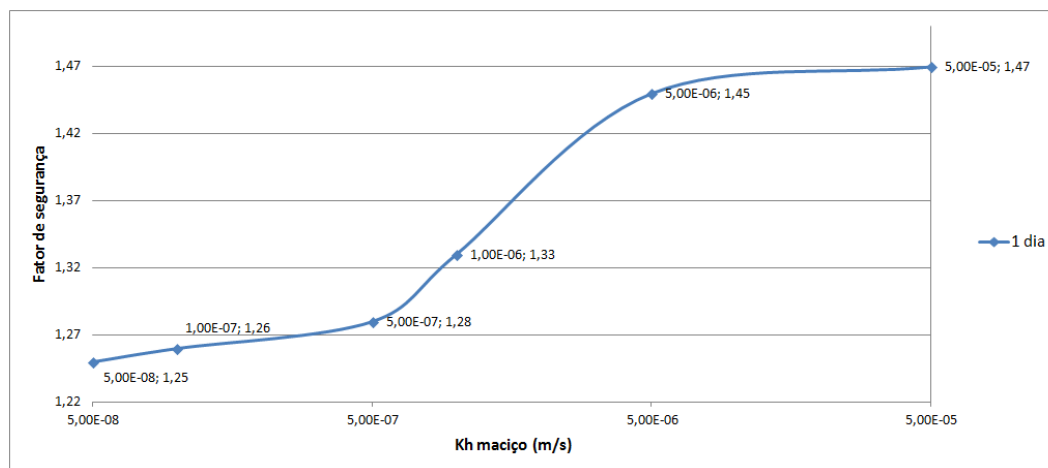


Figura 3.3 Evolução do fator de segurança com aumento da permeabilidade do maciço estabilizador

Como seria expectável, para valores mais elevados do coeficiente de permeabilidade do maciço, maior será também o fator de segurança associado ao esvaziamento. Tal evolução não é alheia ao facto de uma maior permeabilidade do maciço aumentar a facilidade da água percolar no solo e assim dissipar-se mais facilmente o excesso de pressão intersticial que permanece no maciço após o esvaziamento. Apresenta-se a linha de percolação no final do esvaziamento da albufeira para os valores extremos de permeabilidades testados do maciço estabilizador na Figura 3.4.

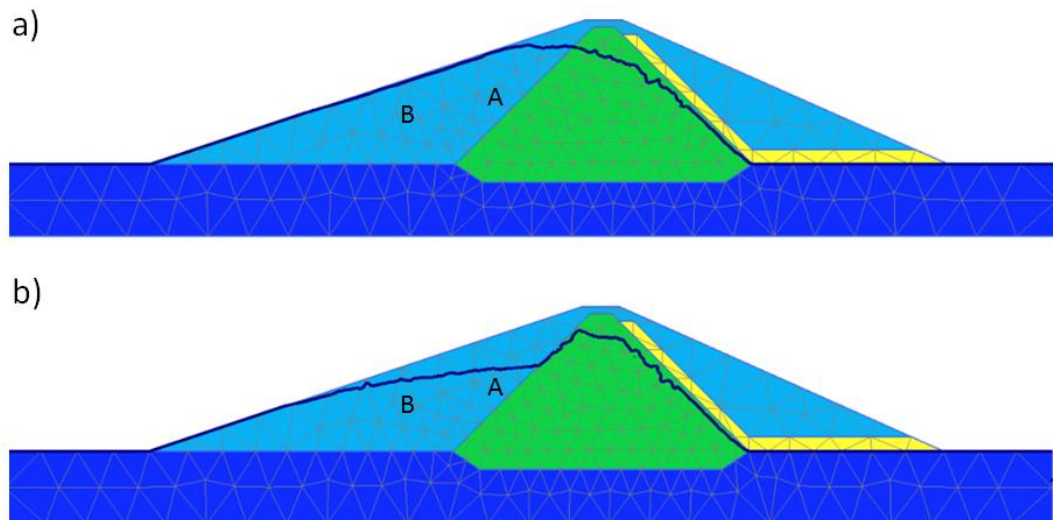


Figura 3.4 Posição da linha de percolação para um esvaziamento total da albufera em um dia com k_h igual em a) $5E-8$ m/s b) $5E-5$ m/s

A posição da linha de percolação confirma as conclusões retiradas no estudo das diferentes permeabilidades. Um valor maior desta implica que a linha de percolação se situe a uma cota mais baixa que para valores menores assumidos para o coeficiente de permeabilidade. Assim, a menor permeabilidade leva a que permaneçam no interior do maciço maiores pressões intersticiais sendo que já não existirá o efeito estabilizador que a água da albufera garantia, como foi estudado no Capítulo 2, tornando assim a estrutura mais instável.

Analisem-se agora dois pontos no maciço estabilizador de montante a cotas diferentes, sendo que o ponto A estará a uma cota superior do ponto B como é indicado nas Figura 3.1 e Figura 3.4 e acompanhe-se a evolução das pressões intersticiais nesse ponto após o esvaziamento total da albufera ao longo do tempo para dois coeficientes de permeabilidade diferentes como é apresentado na Figura 3.5.

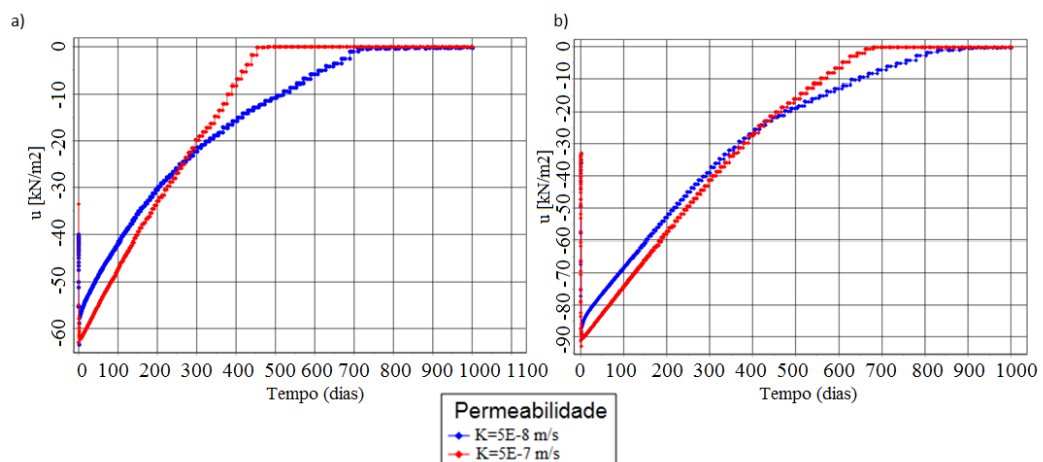


Figura 3.5 Evolução das pressões intersticiais nos pontos a) A e b) B

Registe-se que, como seria lógico, para um ponto de cota mais alta na barragem as pressões intersticiais nulas são alcançadas antes do ponto situado a uma cota mais baixa na barragem de aterro. Comparando os resultados obtidos para cada ponto mas variando a permeabilidade do maciço verifica-se que as pressões nulas são alcançadas primeiro para um maciço mais permeável cuja linha de tendência está a vermelho, ou seja, confirmando os pressupostos analisados anteriormente quanto mais permeável é o maciço mais facilidade este tem para que ocorra o escoamento da água presente neste.

Finalmente, será útil perceber como é afetada a estabilidade da estrutura alterando a relação k_h/k_v do maciço, registando as diferenças obtidas para o fator de segurança considerando uma diminuição da permeabilidade na direção vertical de modo a obter uma nova relação entre estas. As permeabilidades testadas estão dispostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Fator de segurança para diferentes relações k_h/k_v

k_h (m/s)	k_v (m/s)	k_h/k_v	Fator de segurança
5E-08	1E-08	5	1,25
5E-08	5E-09	10	1,30

Verifica-se assim que para uma maior relação k_h/k_v do maciço estabilizador da barragem de aterro é também obtido um fator de segurança superior associado ao esvaziamento rápido. Este incremento do fator de segurança pode ser explicado devido ao aumento da relação k_h/k_v o maciço estará mais estratificado e assim a água percolará mais facilmente neste dissipando-se mais facilmente os excessos de pressões intersticiais que permaneceriam no seu interior.

3.4. Velocidade do esvaziamento

Percebido como a permeabilidade afeta a estabilidade ao esvaziamento rápido, será relevante testar para uma determinada permeabilidade do maciço estabilizador da barragem de aterro que fatores de segurança se obtêm para diferentes velocidades de abaixamento do nível de água da albufeira. Analisem-se então os fatores de segurança para $k_h = 5E-8$ m/s mantendo as propriedades dos restantes solos que constituem a estrutura definidas em 3.2.1 e considerando as velocidades que se mostram na Tabela 3.3 assim como os respetivos resultados na Figura 3.6.

Tabela 3.3 Fator de segurança para diferentes velocidades de esvaziamento

Tempo de esvaziamento albufeira	Velocidade (m/dia)	Fator de segurança
1 dia	17	1,25
1,5 dias	11,33	1,28
2,2 dias	7,72	1,30
7 dias	2,43	1,39
30 dias	0,57	1,46
60 dias	0,28	1,47

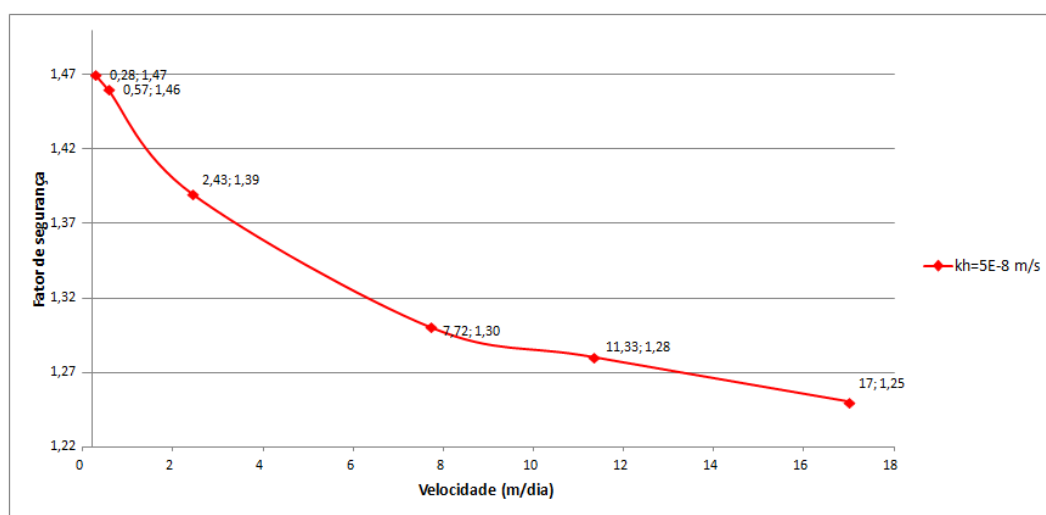


Figura 3.6 Evolução do fator de segurança com o aumento da velocidade

Verifica-se que quanto menor for a velocidade maior será o fator de segurança, afirmação esta que fará todo o sentido. Quanto mais rápido for o escoamento mais difícil será para que a dissipação das pressões intersticiais que permanecem no interior do maciço acompanhem o rebaixamento do nível da albufeira condicionando assim a estabilidade deste. Assim, menores velocidades permitem que a dissipação da água nos solos da barragem acompanhe mais facilmente a descida do nível da albufeira.

Para confirmar ambos os pressupostos apresentados anteriormente outra relação que será útil avaliar será a evolução do fator de segurança com o aumento da permeabilidade para diferentes intervalos de tempo de esvaziamento total da albufeira, resultados esses expostos na Tabela 3.4 e Figura 3.7.

Tabela 3.4 Fator de segurança para diferentes permeabilidades do maciço estabilizador

$K_{\text{maciço}}$ (m/s)		Fator de Segurança para Δt		
K_h	K_v	1 dia	7 dias	30 dias
5E-05	1E-05	1,47	1,47	1,47
5E-06	1E-06	1,45	1,47	1,47
1E-06	2E-07	1,33	1,47	1,47
5E-07	1E-07	1,28	1,46	1,47
1E-07	2E-08	1,26	1,40	1,46
5E-08	1E-08	1,25	1,39	1,46

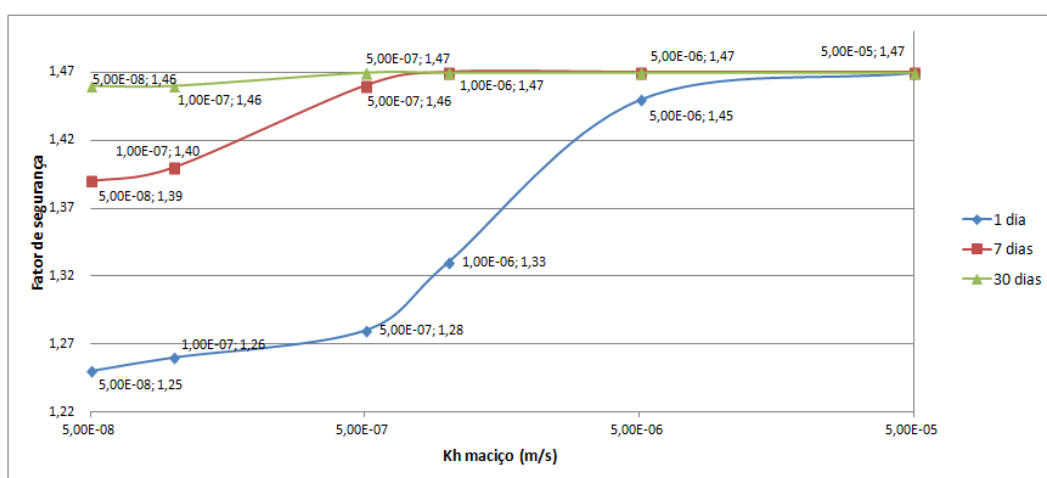


Figura 3.7 Evolução do fator de segurança com o aumento da permeabilidade do maciço

Mais uma vez confirmam-se os pressupostos estabelecidos. Quanto mais permeável for o maciço maior facilidade existirá para que a água se escoe neste ou seja, para que as pressões intersticiais se dissipem e acompanhem assim a descida do nível de água da albufeira. Os fatores de segurança aumentam com o aumento da permeabilidade e, de um modo geral, também com o aumento do tempo para o esvaziamento total da albufeira, ou seja, considerando velocidades menores de abaixamento do nível de água.

É também possível constatar que considerando um k_h do maciço igual a $5,00E-05$ m/s os fatores de segurança obtidos para um esvaziamento total da albufeira em um, sete ou trinta dias são iguais a 1,47. Tal quer dizer que o maciço é tão permeável que as pressões intersticiais neste se dissipam facilmente tanto considerando que o esvaziamento se processa em um dia, sete ou trinta dias não sendo assim estas velocidades condicionantes para a estabilidade do maciço estabilizador de montante.

Outro aspeto que é interessante estudar será analisar para que velocidades se obtêm os mesmos fatores de segurança considerando permeabilidades diferentes para o maciço estabilizador da barragem de aterro. Analise-se então a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Comparação do fator de segurança para diferentes permeabilidades

Tempo esvaziamento albufeira	Velocidade (m/dia)	Fator de Segurança para k_h	
		5E-8 m/s	5E-7 m/s
1 dia	17	1,25	1,28
2 dias	8,50	1,28	1,36
5 dias	3,40	1,36	1,45
11 dias	1,55	1,45	1,47
60 dias	0,28	1,47	-

Tal como foi analisado anteriormente, para uma permeabilidade maior do maciço, e considerando a mesma velocidade de esvaziamento, os fatores de segurança serão maiores pois a maior permeabilidade deste permite que a água se escoe mais facilmente. Assim, para se obterem os mesmos fatores de segurança considerando dois maciços com permeabilidades diferentes terá que se assumir uma velocidade maior para o esvaziamento da albufeira no maciço mais permeável. Tal quer dizer que, como é possível verificar na Tabela 3.5, para um maciço com uma permeabilidade $k_h = 5,00\text{E-}08$ m/s, o fator de segurança de 1,36 é obtido para uma velocidade de 3,40 m/dia ao passo para o maciço com $k_h = 5,00\text{E-}07$ m/s o mesmo fator de segurança é obtido para uma velocidade superior de 8,50 m/dia.

Existe assim uma clara noção que para uma determinada permeabilidade a consideração de diferentes velocidades afeta sobremaneira a estabilidade de uma barragem de aterro. Procura-se então estimar qual é a velocidade de abaixamento para o esvaziamento da albufeira a partir da qual é obtido um fator de segurança menor que obtido para um esvaziamento de 30 dias, ou seja, a partir de que velocidade de abaixamento as pressões intersticiais não se dissipam simultaneamente com o rebaixamento da albufeira. Analise-se então a Figura 3.8.

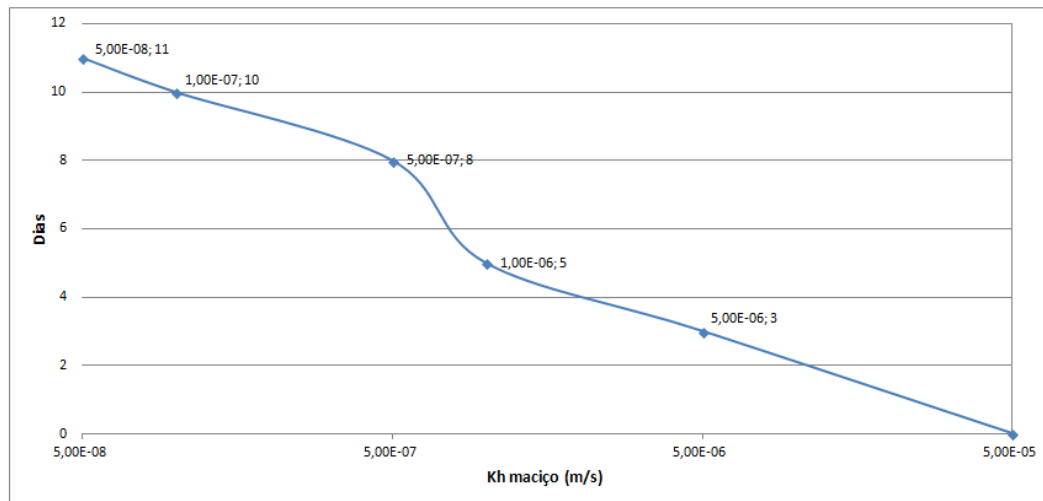


Figura 3.8 Duração mínima do esvaziamento a partir do qual o fator de segurança diminui

Como seria expectável quanto menor é a permeabilidade do maciço mais condicionante será a velocidade definida para o esvaziamento total de uma albufeira. Para uma permeabilidade de $5,00E-05$ m/s a consideração de um esvaziamento em um, sete ou trinta dias é pouco condicionante para a estabilidade do maciço sendo obtido o mesmo fator de segurança ao passo que, para uma permeabilidade $5,00E-08$ m/s, se o esvaziamento se processar em trinta dias é obtido um fator de segurança de 1,47 ao passo que se este se processar em menos de onze dias já é obtido um fator de segurança menor. Uma menor permeabilidade implica assim uma maior sensibilidade na estabilidade do maciço de montante às diferentes velocidades de esvaziamento da albufeira.

Refira-se em último lugar que a variação registada na Figura 3.8 deixa de ser linear quando a permeabilidade do maciço é $5,00E-07$ m/s. Esta não linearidade no comportamento do maciço pode ser explicada pela semelhança de propriedades entre o núcleo e o maciço em termos de coeficiente de permeabilidade.

3.5. Inclinação do maciço estabilizador de montante

Estudada a influência da permeabilidade e da velocidade do escoamento na estabilidade do maciço estabilizador de montante de uma barragem de aterro, procura-se agora perceber como a geometria deste, e a sua inclinação em particular, pode afetar a sua estabilidade.

O pré-dimensionamento de uma barragem de aterro envolve que se conheça através de um plano de prospeção geotécnica detalhado os solos disponíveis no local onde será edificada a

barragem e também nas zonas adjacentes a esta. Sabendo os fatores de segurança que devem ser respeitados, para o maciço estabilizador de montante e maciço estabilizador de jusante, e através da informação recolhida no plano de prospeção geotécnica, são calculadas as inclinações dos taludes e verificado se os volumes disponíveis são suficientes para a construção desta (Quintela e Santana, 2011). Do ponto de vista da segurança quanto menos inclinado for o talude maior será a segurança deste mas também maior será o seu custo daí que o dimensionamento deva garantir uma inclinação compatível com os materiais a utilizar e as condições da fundação.

Considere-se então a mesma barragem de aterro cuja inclinação do maciço estabilizador de montante é de 1:3 (V:H) e analise-se a evolução do fator de segurança quando passa a ter inclinações de 1:2,5 (V:H) e 1:2 (V:H). Comparem-se também os fatores de segurança obtidos considerando diferentes velocidades de esvaziamento para o esvaziamento total da albufeira tomando uma permeabilidade de $k_h = 5,00E-07$ m/s do maciço estabilizador de montante apresentando-se os resultados na Figura 3.9.

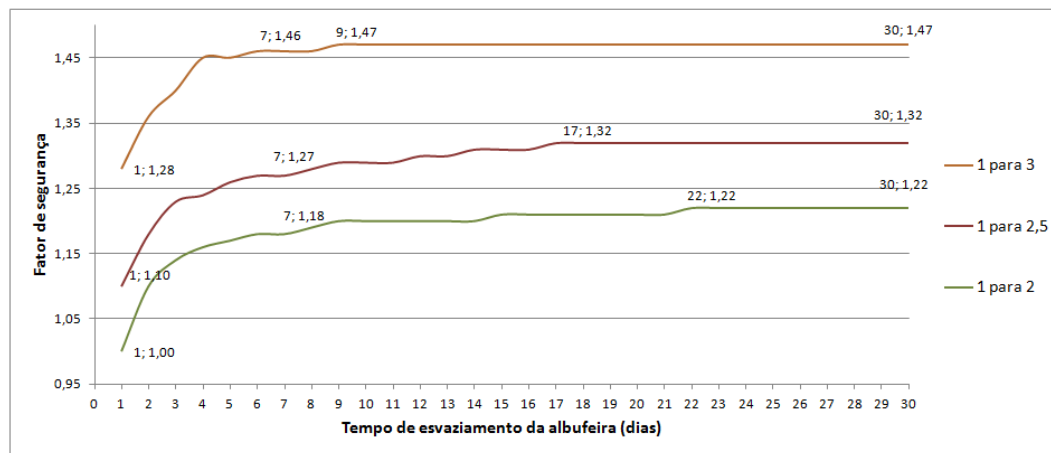


Figura 3.9 Fator de segurança para diferentes velocidades e diferentes inclinações com $k_h = 5,00E-07$ m/s

Através da análise da Figura 3.9, verifica-se que quanto mais inclinado for o maciço estabilizador de montante menor é o fator de segurança associado ao esvaziamento da albufeira tendo sido obtido o maior fator de segurança para uma inclinação de 1:3 (V:H) sendo que também devem ser retiradas outras importantes ilações.

Em primeiro lugar, refira-se que quando se analisou a sensibilidade do maciço estabilizador de montante a diferentes velocidades de esvaziamento verificou-se que para esta permeabilidade em estudo o esvaziamento demorar nove ou trinta dias era irrelevante do ponto de vista da estabilidade. A partir da consideração de uma duração superior a nove dias para o esvaziamento total da albufeira o maciço tinha capacidade de escoar o excesso de pressões intersticiais que permaneciam no seu interior sendo o fator de segurança constante.

Este princípio não se verifica para inclinações maiores do maciço estabilizador de montante pois considerando esvaziamentos totais da albufeira mais lentos que nove dias o fator de segurança continua a aumentar, assumindo o mesmo valor obtido para esvaziamentos de trinta dias para esvaziamentos totais da albufeira em dezassete dias no caso de uma inclinação de 1:2,5 (V:H) e de vinte e dois dias para uma inclinação do maciço estabilizador de montante de 1:2 (V:H). Tal poderá ser explicado devido à maior inclinação do maciço, a estabilidade deste será mais precária, tornando a sua estabilidade mais sensível a diferentes velocidades de esvaziamento.

Voltando a focar a análise do problema apenas nas alterações da geometria do talude e segundo os princípios estudados no Capítulo 2, estas mudanças na geometria do talude implicam necessariamente que um aumento da sua inclinação torne o talude mais instável. Constata-se também que mais uma vez quanto menor for a velocidade de esvaziamento da albufeira mais segura será também a estrutura. No entanto, mesmo considerando um esvaziamento total da albufeira em trinta dias com uma inclinação de 1:2 (V:H), o fator de segurança obtido continua a ser menor do que para um esvaziamento total da albufeira num dia para uma inclinação de 1:3 (V:H).

Tal facto permite ter uma ideia do quão condicionante é a inclinação do maciço estabilizador de montante para a estabilidade da estrutura pois mesmo considerando um esvaziamento muito mais lento a estabilidade da estrutura para uma inclinação de 1:2 (V:H) é mais precária que um esvaziamento total da albufeira em um dia para a mesma barragem de aterro com uma inclinação do maciço estabilizador de montante de 1:3 (V:H). Esta estabilidade cada vez mais precária pode também ser observada através dos dados que se expõem na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Comparação entre regime permanente e regime variável para diferentes inclinações do maciço estabilizador de montante com $k_h=5,00E-7$ m/s

Inclinação	Regime	Velocidade	Fator de Segurança	Diferença
1 para 3	Permanente	-	1,48	0,20
	Esvaziamento	17m/dia	1,28	
1 para 2,5	Permanente	-	1,47	0,37
	Esvaziamento	17m/dia	1,10	
1 para 2	Permanente	-	1,47	0,47
	Esvaziamento	17m/dia	1,00	

Como se pode observar, quanto maior é a inclinação do maciço estabilizador de montante, maior é também a diferença entre o fator de segurança calculado quando a albufeira se encontra cheia na situação de pleno armazenamento e o fator de segurança obtido quando se analisa o esvaziamento. Ou seja, confirmando os pressupostos expostos no Capítulo 2 a maior inclinação do maciço torna-o menos estável numa situação de esvaziamento rápido.

Finalmente, apresenta-se a mesma análise mas considerando um $k_h = 5,00E-08$ m/s para o maciço estabilizador de montante sendo que para esta permeabilidade as linhas de tendência apresentam-se a com marcadores triangulares na Figura 3.10 para facilitar a comparação com os resultados obtidos anteriormente.

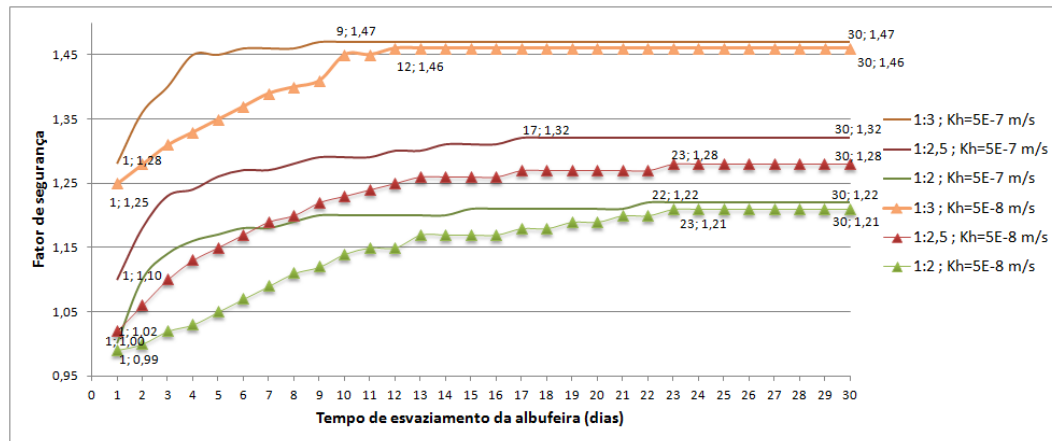


Figura 3.10 Fator de segurança para diferentes velocidades e diferentes inclinações com $k_h = 5,00E-07$ m/s e $k_h = 5,00E-08$ m/s

Como esperado, todos os princípios estudados anteriormente para um valor do coeficiente de permeabilidade maior são corroborados nesta análise. Saliente-se apenas que a menor permeabilidade torna a estabilidade do maciço estabilizador de montante ainda mais precária sendo os fatores de segurança menores ainda que na situação de estudo anterior.

Na presente análise paramétrica ainda se considerou estudar a influência que a altura da barragem de aterro poderia ter na sua estabilidade. No entanto, com o aumento da altura da barragem e com os solos que se consideraram para a construção desta, a estrutura colapsava daí que seria necessário aumentar os parâmetros de resistência dos solos estando assim a ser comparadas duas grandezas diferentes não podendo ser retiradas conclusões dos resultados que iriam ser obtidos.

3.6. Evolução do fator de segurança ao longo do esvaziamento

A estabilidade de uma barragem de aterro como foi demonstrado anteriormente é bastante afetada pelo fenómeno do esvaziamento rápido. É útil estudar se o fator de segurança obtido para análise do esvaziamento assume o seu valor mínimo quando o esvaziamento chega ao fim,

ou seja quando a albufeira se encontra vazia, ou se tal sucede numa fase intermédia do esvaziamento.

Considere-se então a mesma albufeira em que ocorre um esvaziamento total desta a velocidades de 34 m/dia, 17 m/dia, 2,43 m/dia e 0,57 m/dia e avalie-se a evolução do fator de segurança à medida que o nível de água na albufeira vai descendo, para uma permeabilidade do maciço $k_h = 5,00E-08$ m/s apresentando-se os resultados na Figura 3.11.

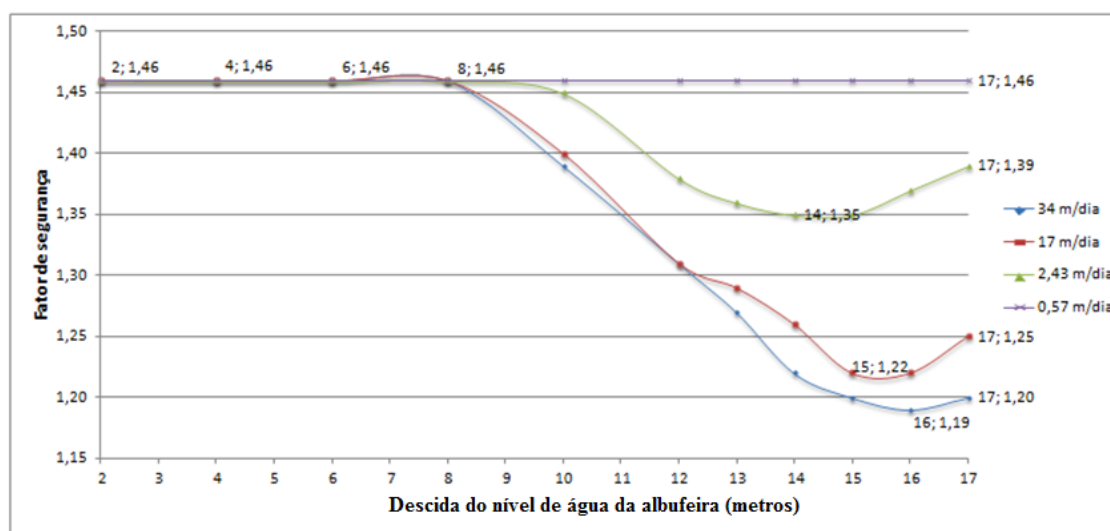


Figura 3.11 Evolução do fator de segurança ao longo do esvaziamento

Verifica-se que à medida que o esvaziamento decorre mais instável vai ficando o maciço estabilizador de montante, sendo que até o nível de água da albufeira descer oito metros o fator de segurança mantém-se relativamente constante para todas as velocidades assumidas para o esvaziamento.

No entanto, a partir do momento que o nível da albufeira desce para lá dos oito metros o fator de segurança diminui assumindo valores mínimos consoante a velocidade de esvaziamento da albufeira assumida. O fator de segurança mínimo é obtido para um nível de água da albufeira a uma cota superior quanto mais lenta é a velocidade de esvaziamento da albufeira considerada. No caso de um esvaziamento a uma velocidade de 34 m/dia o fator de segurança mínimo é obtido quando a água da albufeira desceu dezasseis metros, para 17 m/dia é obtido quando desceu quinze metros e, finalmente, para 2,43 m/dia quando ocorreu um rebaixamento de catorze metros o que corrobora com os pressupostos estabelecidos por Viratjandr e Michalowski (2006) referidos na presente dissertação.

Também os estudos de Sherard et al. (1963) em que foram compiladas informações relativas a colapsos em barragens de aterro por fenómenos de esvaziamento rápido devem ser mencionados pois estes verificaram que o colapso acontecia antes de se atingir o nível máximo

de esvaziamento (Pinyol et al., 2008). Os resultados aqui apresentados corroboram também com este pressuposto, devendo então o esvaziamento rápido ser estudado não apenas quando este chega ao final mas sim à medida que o nível de água da albufeira desce pois poderá ser obtido um fator de segurança crítico antes do esvaziamento terminar.

3.7. Considerações finais

No presente capítulo foram discutidos os principais fatores que influenciam a estabilidade de uma barragem de aterro quando esta está sujeita a uma situação de esvaziamento rápido assim como a evolução da dissipação das pressões intersticiais no maciço estabilizador de montante durante o esvaziamento rápido.

Testaram-se através de uma análise paramétrica não só diferentes coeficientes de permeabilidade para o solo com que é construído o maciço estabilizador de montante e a inclinação desse mesmo maciço, como também diferentes velocidades para o esvaziamento da albufeira procurando estabelecer uma relação entre estes fatores e a segurança da estrutura.

Em relação à permeabilidade constata-se que quanto mais permeável é o maciço de uma barragem de aterro mais segura esta será ao esvaziamento rápido. Quer isto dizer que existirá uma maior facilidade para que se dê a dissipação do excesso de pressões intersticiais que permanece na estrutura levando assim a que esta dissipação acompanhe o rebaixamento do nível da água da albufeira tornando assim a estrutura mais estável.

Poderão ser feitos alguns paralelismos entre a influência da permeabilidade dos materiais da barragem com a análise de diferentes velocidades de esvaziamento. Quanto mais lenta for esta velocidade mais facilidade existirá para que a dissipação das pressões intersticiais que permanecem no maciço acompanhem o rebaixamento do nível da albufeira tornado assim a estrutura mais estável. Assim, a situação crítica para a estabilidade será uma barragem com solos muito pouco permeáveis e uma velocidade de esvaziamento elevada.

Observa-se também que o fator de segurança mínimo não é obtido quando a albufeira se encontra vazia mas sim antes do esvaziamento terminar. Este facto torna uma análise segundo o método dos elementos finitos à estabilidade ao esvaziamento rápido de particular utilidade pois permite identificar com facilidade quando é obtido o fator de segurança mínimo.

Finalmente, quando analisada a geometria do paramento a montante observou-se que quanto mais inclinado este é mais instável também será a estrutura. Esta afirmação confirma os

pressupostos estabelecidos pela mecânica dos solos em que quanto menos inclinado for um determinado talude mais estável este será.

Terminada a análise dos parâmetros que influenciam a estabilidade de uma barragem de aterro ao esvaziamento rápido será agora estudado o caso de uma barragem submetida a este fenómeno. Serão comparados os resultados utilizando o programa Plaxis 2D e os resultados obtidos utilizando o dimensionamento de uma barragem de aterro ao esvaziamento rápido através de um método de equilíbrio limite.

Capítulo 4

Caso de estudo: Análise da barragem de Alcobertas

4.1. Introdução

Como foi referido na presente dissertação, a análise da estabilidade de uma barragem de aterro em fase de esvaziamento rápido pode ser feita através de métodos de equilíbrio limite com algumas particularidades ou então com recurso a *software* que utilize o método dos elementos finitos.

No presente capítulo será estudada a estabilidade da barragem de Alcobertas ao esvaziamento rápido. Trata-se de uma barragem de aterro ainda não construída cujo projeto data de 2003. Em primeiro lugar será descrita a estrutura sendo de seguida comparados os resultados obtidos entre uma análise utilizando um método de equilíbrio limite simplificado, tal como foi utilizado no projeto, e outra com o programa Plaxis 2D que utiliza conceitos da formulação de um problema segundo o método dos elementos finitos.

Seguidamente, e tendo presente algumas das limitações inerentes à análise de estabilidade numa situação de esvaziamento rápido segundo um método de equilíbrio limite, será estudado com o programa Plaxis 2D qual a situação para a qual se obtém o mesmo fator de segurança

calculado segundo o método de equilíbrio limite assim como quando se verificam situações que coloquem em risco a estabilidade da barragem de aterro.

4.2. Descrição da barragem de Alcobertas

4.2.1. Características dos materiais

Os parâmetros geotécnicos considerados em projeto e adotados no presente estudo são os que se indicam na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Propriedades dos materiais da barragem de Alcobertas

	Fundação aluvionar	Fundação resistente	Filtros	Maciço	Núcleo
γ (kN/m ³)	20	21	17	21	20,5
γ_{sat} (kN/m ³)	21	22	19	21,5	21
k_x (m/s)	1E-06	1E-07	5E-04	1E-06	1E-07
k_y (m/s)	1E-06	1E-07	5E-04	1E-07	1E-08
E_{ref} (MPa)	30	100	30	20	12
ν	0,3	0,3	0,3	0,35	0,4
c' (kPa)	20	50	1	2	20
Φ' (°)	30	40	36	31	28
Comportamento	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado	Não Drenado

4.2.2. Perfil tipo da barragem

O local da barragem situa-se num vale aberto aplanado e assimétrico onde a margem esquerda apresenta um declive maior relativamente à margem direita. Geologicamente, a fundação da barragem é constituída por uma formação denominada “Complexo Detrítico de Alcanede” situada por baixo de depósitos aluvionares.

Tem a altura máxima de 22 m e o volume total de aterros necessários para a sua construção é de cerca de 105 000 m³. O coroamento da barragem, com 7 m de largura e cerca de 172 m de desenvolvimento, situa-se à cota 69,00, 3 m acima do nível de pleno armazenamento (NPA) e 1 m acima do nível de máxima cheia (NMC).

Quanto aos maciços estabilizadores, o maciço estabilizador de montante tem uma inclinação de 1:3 (V:H) e o maciço estabilizador de jusante de 1:2,3 (V:H) apresentando este uma banquetta à cota de 51,50 com 2m de largura. O núcleo central, com coroamento à cota de 68,00,

apresenta a mesma inclinação tanto a montante como jusante de 2:1 (V:H) prolongando-se na fundação através de uma vala corta-águas, cujos taludes de escavação têm a inclinação de 1:1 (V:H). Esta vala corta-águas terá como função impermeabilizar a camada superior do maciço de fundação, mais alterada e fraturada, aumentando o caminho de percolação das águas pela fundação da barragem e ao mesmo tempo reduzir o caudal percolado. A Tabela 4.1 ilustra a descrição apresentada.

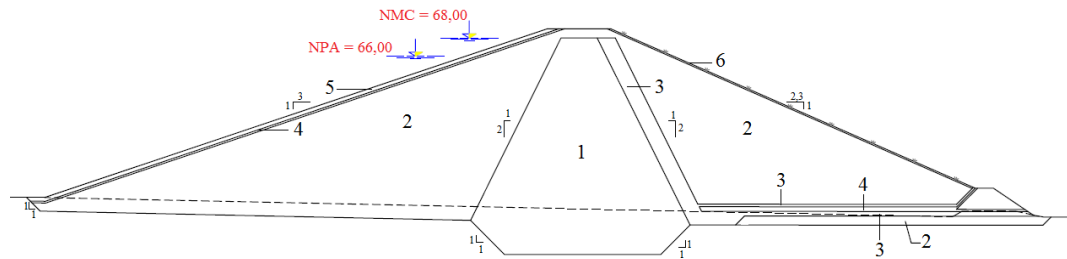


Figura 4.1 Perfil de maior altura da barragem de Alcobertas

1-Núcleo; 2-Maciços estabilizadores; 3-Filtro; 4-Dreno; 5-Proteção do paramento de montante; 6-Revestimento vegetal

Em relação aos elementos do sistema de drenagem para além da vala corta-águas, que é simétrica em relação ao eixo da barragem a uma profundidade constante de 3,5 m abaixo do terreno após o saneamento, a barragem dispõe ainda de um sistema de drenagem principal, a jusante do núcleo, constituído por um filtro chaminé inclinado e por tapetes coletores longitudinais que ligam a um tapete drenante de saída, constituído por areias e britas, que termina num dreno de pé em enrocamento.

No paramento de montante prevê-se a execução de uma camada de enrocamento de proteção contra a ação erosiva das ondas geradas na albufeira pela ação do vento, no paramento de jusante a execução de uma camada de revestimento vegetal para proteção da ação erosiva da água das chuvas.

Os materiais utilizados para o enrocamento, drenos e britas serão provenientes de pedreiras em exploração próximo do local da barragem. Os materiais arenosos utilizados nos filtros deverão, em princípio, provir de areeiros em exploração também nas proximidades do local da barragem.

4.3. Análise segundo método de equilíbrio limite

Os estudos de percolação têm como finalidade a avaliação dos caudais percolados através do corpo da barragem e da fundação permitindo verificar a capacidade de evacuação do sistema de drenagem principal. Estes estudos podem também ser importantes para o reconhecimento de potenciais situações críticas associadas à estabilidade de uma barragem de aterro relacionadas com o nível de água da albufeira. Neste caso em particular identificou-se a situação em que poderia ocorrer um rebaixamento do nível de água da albufeira da cota 66,00 correspondente ao nível de pleno armazenamento (NPA), para a cota 57,30 correspondente ao nível mínimo de exploração (NME), em 14 dias sendo assim necessário avaliar as consequências desta descida na estabilidade da barragem em estudo. No dimensionamento através de um método de equilíbrio limite não é possível ter em conta o tempo que esse rebaixamento do nível da água da albufeira demora mas efetuou-se a análise para este rebaixamento de 8,7 m, desde a cota 66,00 para a cota 57,30, considerando que não haveria dissipação da pressão intersticial, isto é, que a linha piezométrica se mantinha no paramento de montante, abaixo da camada de enrocamento.

Os cálculos de estabilidade foram realizados com recurso ao programa de cálculo automático STABIL desenvolvido pela firma projetista que, utilizando métodos de equilíbrio limite (método de Bishop simplificado), permite determinar o fator de segurança relativo a cada superfície circular analisada pesquisando o círculo mais desfavorável. Este fator de segurança traduz a relação entre as ações estabilizadoras (resistência ao corte dos materiais de aterro) e as ações instabilizadoras (peso próprio).

Foi realizada uma análise em condições estáticas nesta fase de esvaziamento rápido sendo esta identificada como uma situação crítica para o maciço de montante como foi estudado ao longo da dissertação. Ao admitir-se uma descida rápida da água na albufeira a linha de saturação no maciço de montante manter-se-á próxima da de pleno armazenamento sendo que a constituição do maciço estabilizador de montante permitirá apenas alguma dissipação das pressões intersticiais. A pesquisa automática das superfícies de escorregamento foi efetuada tendo como origem as extremidades de montante e de jusante do coroamento.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os fatores de segurança mínimos calculados sendo que na Figura 4.2 se expõem esquematicamente tanto o perfil da barragem como as respetivas superfícies de escorregamento críticas.

Tabela 4.2 Fatores de segurança mínimos na fase de esvaziamento rápido calculados através de um método de equilíbrio limite

Origem das superfícies de escorregamento	FS calculado	FS requerido
Coroamento a jusante	1,84	1,3
Coroamento a montante	1,60	

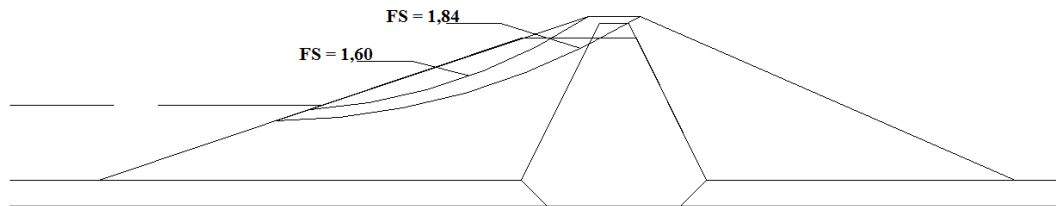


Figura 4.2 Fase de esvaziamento rápido, superfícies de escorregamento críticas em condições estáticas

Desta forma, pode-se concluir que através desta análise recorrendo a um método de equilíbrio limite, que a estabilidade da barragem de aterro numa situação de esvaziamento rápido está salvaguardada pois o fator de segurança mínimo obtido de 1,60 é superior ao requerido segundo a legislação Portuguesa, no RSB, de 1,3. No entanto, esta análise apresenta algumas limitações que foram já discutidas ao longo do presente documento apresentando-se em seguida uma análise à mesma situação mas desta vez recorrendo ao programa Plaxis 2D que ultrapassa algumas dessas mesmas limitações.

4.4. Análise com o programa Plaxis 2D

Em relação à modelação da barragem de Alcobertas no programa Plaxis 2D esta foi simulada admitindo um estado de deformação plana e um comportamento elasto-plástico para todos os materiais que a constitui. Utilizaram-se os parâmetros dos solos definidos em 4.2.1 para o núcleo, maciços estabilizadores, filtro, fundação profunda e fundação superficial com uma malha de elementos finitos fina constituída por elementos triangulares de 15 nós, tendo sido refinada no núcleo da barragem tal como é ilustrado na Figura 4.3.

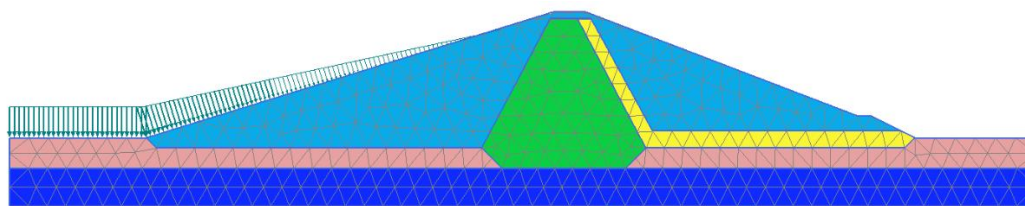


Figura 4.3 Malha de elementos finitos da barragem de Alcobertas

No que respeita às condições de fronteira, admitiu-se que os deslocamentos horizontais são impedidos nas fronteiras vertical e horizontal e que os deslocamentos verticais são impedidos apenas na base do modelo ou seja, na fronteira horizontal.

Antes de se avaliar a situação de esvaziamento rápido da albufeira é importante analisar a situação de pleno armazenamento ilustrada na Figura 4.4 para confirmar que o modelo apresenta o comportamento esperado.

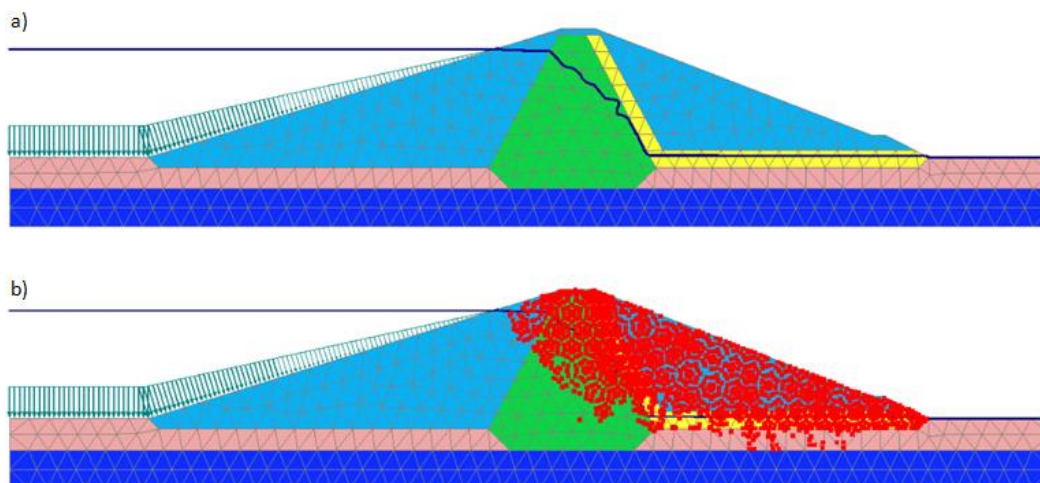


Figura 4.4 Situação de pleno armazenamento com a) posição da linha de percolação e b) Pontos de rotura plástica Mohr-Coulomb

Relativamente à posição da linha de saturação, esta está posicionada como seria de esperar, ou seja, desce ao ligeiramente ao longo do núcleo assumindo uma descida mais acentuada junto do filtro seguindo depois o caudal percolado pelo tapete drenante. Apesar deste tapete drenante não ser igual ao filtro foi modelado como sendo o mesmo material pois possuíam características em todo semelhantes. Por sua vez, relativamente aos pontos de rotura plástica que indicam pontos no solo que atingiram a plasticidade, estes estão situados essencialmente no maciço estabilizador de jusante o que fará todo o sentido pois é a estabilidade deste que é condicionada nesta situação.

Modelou-se de seguida uma fase de esvaziamento cujas características foram já discutidas em 4.3 ou seja, uma descida do nível de água da cota 66,00 para 57,30 durante 14 dias. O programa Plaxis 2D permite ter em conta o tempo que demora este abaixamento sendo que

depois de modelada esta fase se avaliaram os deslocamentos totais no maciço como é representado na Figura 4.5.

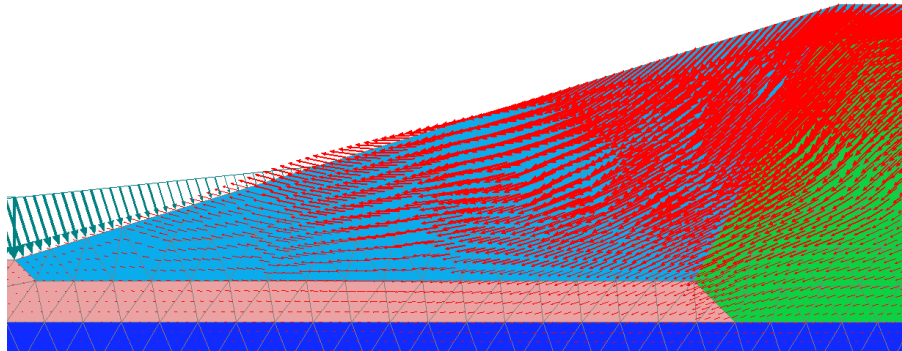


Figura 4.5 Deslocamentos totais na barragem provocados pelo esvaziamento

Em relação à Figura 4.5, esta permite ter uma clara noção para onde estão dirigidos os deslocamentos em módulo numa fase de esvaziamento da albufeira ficando as setas dirigidas para montante, indicando que a estabilidade do paramento de montante ficará condicionada, refira-se no entanto que a dimensão das setas é meramente ilustrativa.

Voltando à avaliação de estabilidade esta foi feita segundo o *classical mode* e também segundo o *advanced mode* tendo os resultados obtidos sido semelhantes, logo, como se analisou previamente em 2.5.4 pode-se desprezar o efeito da sucção do solo nesta avaliação de estabilidade. O fator de segurança calculado corresponde a um valor constante de $\sum M_{sf}$ apresentando-se os resultados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Fatores de segurança na fase de esvaziamento rápido calculados com o programa Plaxis 2D

Fator de Segurança		
Classical Mode	Advanced Mode	Requerido
1,59 (=1,587)	1,58 (= 1,577)	1,3

Mais uma vez a estabilidade da estrutura esta salvaguardada pois o fator de segurança obtido é superior a 1,3. No entanto, importa agora comparar os resultados obtidos pelos dois métodos em estudo e tirar algumas ilações que serão feitas seguidamente.

4.5. Comparação dos resultados obtidos

No presente capítulo foram calculados fatores de segurança associados ao esvaziamento rápido da albufeira da barragem de Alcobertas através de dois métodos procurando averiguar se a estrutura não tem problemas de estabilidade associados a este fenómeno. Apresentam-se na Tabela 4.4 os valores obtidos.

Tabela 4.4 Fatores de segurança ao esvaziamento rápido calculados

Fator de Segurança		
Método equilíbrio limite	Plaxis 2D	Requerido
1,60	1,59	1,3

Neste caso em particular, verifica-se que os resultados calculados para o fator de segurança são praticamente iguais utilizando qualquer um dos métodos. Assim, o estudo da barragem com recurso a um programa que utilize o método dos elementos finitos para analisar a estabilidade a esta situação não é de todo fundamental. No entanto, o método dos elementos finitos permite facilmente estudar em que situação a barragem poderia sofrer problemas de estabilidade considerando uma nova velocidade de esvaziamento ou um novo nível de abaixamento de água da albufeira.

Em primeiro lugar, avaliando a mesma descida do nível de água da albufeira da cota 66,00 para a cota 57,30 mas alterando o tempo de duração da mesma avaliem-se que fatores de segurança que se obtêm consultando a Tabela 4.5 e Figura 4.6.

Tabela 4.5 Fatores de segurança para esvaziamento a diferentes velocidades da barragem de Alcobertas

Descida (m)	Duração (dias)	Velocidade (m/dia)	Fator de Segurança
8,7	16,5	0,53	1,627
8,7	16	0,54	1,602
8,7	15,5	0,56	1,601
8,7	15	0,58	1,593
8,7	14,5	0,60	1,592
8,7	14	0,62	1,587
8,7	7	1,24	1,514
8,7	6	1,45	1,487
8,7	5	1,74	1,468
8,7	4	2,18	1,445
8,7	3	2,90	1,386
8,7	2	4,35	1,315
8,7	1,5	5,80	1,270
8,7	1	8,70	1,234
8,7	0,5	17,40	1,157

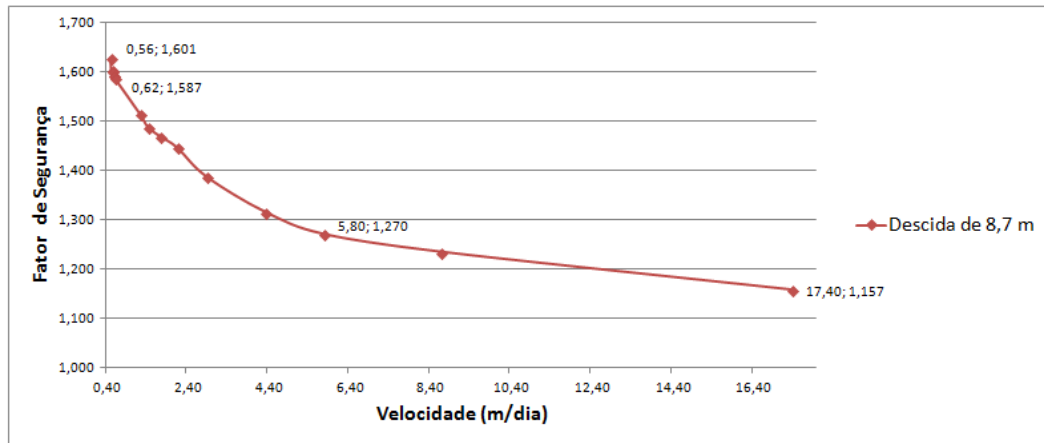


Figura 4.6 Relação entre o FS e velocidade de esvaziamento para uma descida do nível de água da barragem de Alcobertas de 8,7 m

Estes resultados permitem retirar algumas conclusões. Em primeiro lugar, para se obter um fator de segurança igual ao calculado através do método de equilíbrio limite tem de se considerar uma velocidade de 0,56 m/dia ou seja, que o rebaixamento considerado demora 15,5 dias em vez de 14 dias. Em segundo lugar, tal como na análise paramétrica efetuada no Capítulo 3, quanto maior for a velocidade considerada mais instável será a barragem de aterro sendo que a situação crítica para a sua estabilidade em que o fator de segurança é menor que o requerido de 1,3 ocorre a partir de uma velocidade de esvaziamento de 5,80 m/dia que corresponde a uma descida de 8,7 metros em 1,5 dias. Tendo em conta que os estudos feitos à albufeira identificaram que a possível descida do nível de água entre o NPA e o NME decorreria em 14 dias existe assim uma margem de segurança de 12,5 dias entre o tempo da descida passível de suceder com o tempo de duração da descida do nível de água da albufeira que originaria uma situação crítica à estabilidade.

Compare-se agora a posição da linha de percolação entre a situação original em que se obteve um fator de segurança de 1,587 com a situação mais gravosa estudada para a estabilidade quando o fator de segurança é de 1,157 apresentada na Figura 4.7.

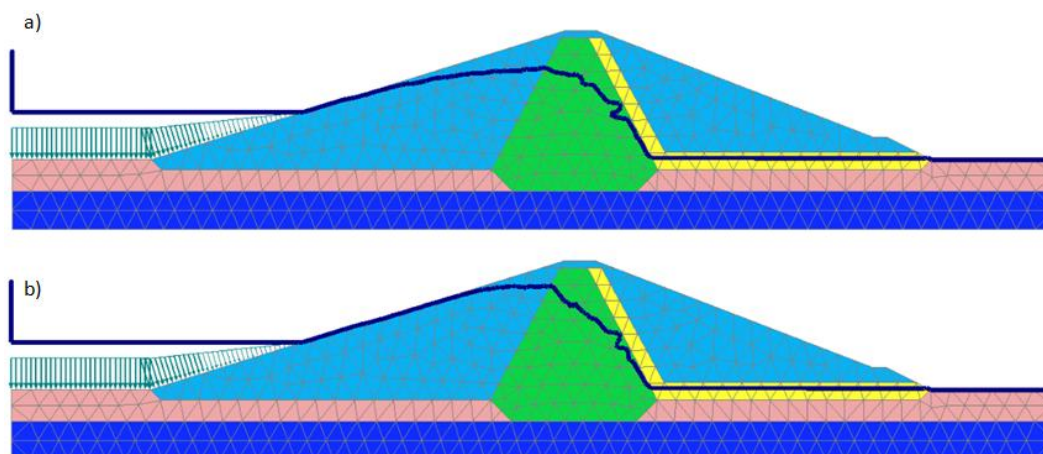


Figura 4.7 Linha de percolação para velocidades de abaixamento de a) 0,62 m/dia b) 17,40 m/dia

Existe uma diferença na posição da linha de percolação no maciço estabilizador de montante. Como era esperado, esta situa-se a uma cota superior para o esvaziamento mais rápido ou seja, não houve tempo suficiente para que as pressões intersticiais no maciço se dissipassem com a mesma facilidade que acontecia para um esvaziamento mais lento sendo menor o fator de segurança associado à velocidade mais elevada.

Tendo já sido estudado o efeito da velocidade procure-se então agora considerando a velocidade original de 0,62 m/dia, tentar perceber para que descida do nível de água da albufeira se obteria o mesmo fator de segurança calculado segundo um método de equilíbrio limite. Será lógico que para haver um incremento do fator de segurança de 1,587 para 1,60 terá de se considerar um esvaziamento inferior a 8,7 m tendo sido obtido um fator de segurança de 1,60 para uma descida de 7,7 m tal como é ilustrado na Figura 4.8.

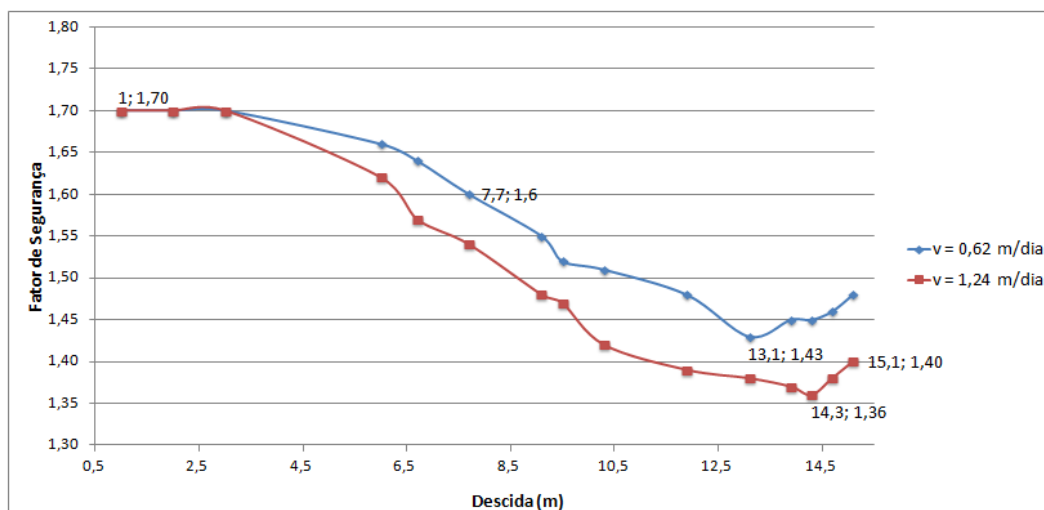


Figura 4.8 Evolução do fator de segurança ao longo do esvaziamento da barragem de Alcobertas para duas velocidades diferentes

Optou-se por incluir também na Figura 4.8 o estudo de uma velocidade maior pois considerando uma velocidade de 0,62 m/dia para a descida do nível de água o fator de segurança era sempre superior a 1,3. No entanto, mesmo considerando o dobro da velocidade de um possível rebaixamento da albufera o fator de segurança mínimo é de 1,36 ou seja, ainda superior ao mínimo exigível de 1,3.

Mais uma vez, confirmam-se os pressupostos estudados na análise paramétrica feita no Capítulo 3. Para além do fator de segurança mínimo não se verificar no final do esvaziamento mas sim antes deste chegar ao fim, para uma velocidade superior de esvaziamento, o fator de segurança mínimo é alcançado com uma altura de água da albufera menor que numa velocidade de abaixamento mais lenta.

Este último estudo permite assim concluir que mesmo com uma velocidade de abaixamento igual ao dobro da que se possa verificar na realidade a estrutura continua a respeitar os requisitos de segurança ao esvaziamento rápido.

4.6. Considerações finais

O objetivo principal do presente capítulo consistiu na realização de cálculos de estabilidade de um caso de uma barragem de aterro real através de duas metodologias de cálculo diferentes, uma recorrendo a um método de equilíbrio limite e outra utilizando um programa que utiliza os conceitos do método dos elementos finitos.

Os resultados obtidos pelas duas metodologias foram semelhantes o que, se por um lado revela o correto dimensionamento que tinha sido efetuado, por outro revela que neste caso particular uma análise através de um programa que utilize o método dos elementos finitos não é fundamental. De facto, apesar de esta metodologia ultrapassar algumas limitações inerentes aos cálculos de estabilidade ao esvaziamento rápido já discutidas no Capítulo 2 da presente dissertação, neste caso em particular, mesmo com as limitações associadas ao dimensionamento através de métodos de equilíbrio limite, estes fornecem resultados bastante bons.

O facto de tanto através de um método de equilíbrio limite como através de um programa que utiliza o método dos elementos finitos os fatores de segurança obtidos serem claramente superiores ao mínimo exigível de 1,3 leva a que não sejam necessárias medidas corretivas no projeto da barragem de Alcobertas, tais como a colocação de um sistema de drenagem auxiliar no maciço estabilizador de montante ou a até mesmo a construção deste como um solo mais permeável.

Optou-se por utilizar as potencialidades de uma análise com o programa Plaxis 2D, em particular na utilização do método dos elementos finitos, para identificar situações críticas à estabilidade da barragem de Alcobertas. Para a possível descida do nível de água da albufeira de 8,7 m determinou-se a que velocidade poderiam ser obtidos fatores de segurança menores que os exigíveis tendo sido identificada uma grande margem entre a situação passível de se verificar na realidade com a que foi identificada como crítica no programa computacional.

Finalmente, mantendo a velocidade de esvaziamento que se considerou possível acontecer através de estudos preliminares da albufeira, identificou-se para que descida do nível de água era obtido o fator de segurança mínimo, ou seja, o momento de maior instabilidade para a barragem em estudo, estando também ele bastante longe do mínimo admissível implicando assim que a estabilidade da estrutura esteja mais uma vez completamente assegurada.

Capítulo 5

Conclusões finais e futuros desenvolvimentos

No presente documento pretendeu-se estudar o fenómeno do esvaziamento rápido em barragens de aterro, as possíveis consequências que este pode provocar numa estrutura deste tipo assim como os métodos de análise existentes para o dimensionamento nesta situação crítica.

Em primeiro lugar, foi descrito o fenómeno e o porquê deste ser condicionante da estabilidade do maciço estabilizador de montante de uma barragem de aterro. Compreendeu-se que esta possível instabilidade está não só relacionada com a água que permanece no maciço, após o esvaziamento, mas também pelo efeito estabilizador que a água da albufeira transmite com forças que se opõem ao deslizamento que deixa de existir após o esvaziamento.

Foram identificados alguns fatores que podem tornar uma barragem de aterro mais ou menos estável, em situação de esvaziamento rápido da albufeira, sendo também mencionados métodos de análise que permitem que o dimensionamento seja feito corretamente.

De seguida, tendo presente os parâmetros que influenciam uma maior ou menor estabilidade de uma barragem de aterro ao esvaziamento rápido foi feita uma análise paramétrica de onde foram retiradas algumas importantes conclusões.

Em relação ao coeficiente de permeabilidade do material presente no maciço estabilizador de montante conclui-se que, quanto mais elevado este for, mais estável será a estrutura. Sendo o solo mais permeável, existirá mais facilidade para que a dissipação da pressão intersticial da água, que permanece no maciço estabilizador de montante, se dê acompanhando a descida do nível de água da albufeira e ficando a estrutura mais estável. A velocidade a que o abaixamento se processa é também um fator importante. Uma menor velocidade permite também que a dissipação da pressão intersticial da água do maciço estabilizador de montante acompanhe a descida do nível de água da albufeira ficando mais uma vez a estrutura mais estável.

Por sua vez, em relação à inclinação do maciço estabilizador de montante, quanto mais inclinado este for, mais instável será a barragem de aterro. Confirmou-se que quanto mais íngreme for o paramento de montante, maior é a diferença entre o fator de segurança calculado para a situação de pleno armazenamento e o calculado para a fase de esvaziamento rápido. Uma maior inclinação do paramento de montante torna a sua estabilidade mais condicionante numa situação de esvaziamento rápido.

Finalmente, a última conclusão da análise paramétrica relaciona-se com o facto de ter sido confirmado que o momento de maior instabilidade numa situação de esvaziamento rápido pode não se verificar quando a albufeira está vazia mas sim quando esta ainda apresenta um nível de água considerável. A cota do nível de água a que acontece o momento de maior instabilidade está relacionada com a velocidade a que se processa o esvaziamento, sendo o nível de água tanto maior quanto mais lento o esvaziamento for.

Terminada a análise paramétrica efetuou-se o estudo de uma situação real, a barragem de Alcobertas. Foram comparados os resultados através do dimensionamento ao esvaziamento rápido, feito no âmbito do projeto, através de um método de equilíbrio limite, com os resultados obtidos através do programa Plaxis 2D que utiliza o método dos elementos finitos aplicado a estruturas geotécnicas.

Apesar das limitações do dimensionamento através de métodos de equilíbrio limite numa situação de esvaziamento rápido, fundamentalmente por não poder ser possível simular um regime variável, os resultados obtidos foram em todo semelhantes. Não é assim de particular interesse o estudo segundo um programa computacional que utilize o método dos elementos finitos nesta situação. No entanto, aproveitando as potencialidades que este tipo de análise permite foram identificadas situações críticas à estabilidade da barragem de Alcobertas.

Concluiu-se que, para a descida do nível de água que se considera previsível acontecer, para ser obtido um fator de segurança menor que o exigível de 1,3 esta descida teria de suceder em menos de 1,5 dias. Tendo em conta que os estudos hidráulicos identificaram para o tempo

possível deste abaixamento a duração de 14 dias, existe assim uma grande margem de segurança à estabilidade da barragem de Alcobertas em situação de esvaziamento rápido. Analisando a velocidade a que é possível que ao longo do funcionamento da barragem se processe o esvaziamento, mesmo que em vez de uma descida de 8,7 m identificada nos estudos hidráulicos, suceda um esvaziamento total da albufeira, o fator de segurança obtido nunca é menor que o exigível de 1,3. Mais uma vez, a estabilidade da barragem de Alcobertas ao esvaziamento rápido está completamente assegurada.

Em termos gerais os objetivos propostos para esta dissertação foram alcançados, uma vez que foi obtida informação relevante, tanto através da análise paramétrica, relativamente aos aspetos que condicionam a estabilidade de uma barragem de aterro em situação de esvaziamento rápido, bem como a comparação entre os resultados obtidos utilizando um método de equilíbrio limite e o método dos elementos finitos no dimensionamento de uma barragem de aterro nessa situação. Adicionalmente, foi ainda possível identificar as características do esvaziamento rápido correspondente à situação mais crítica a que a barragem de Alcobertas poderia estar submetida.

Retiradas todas estas conclusões é importante agora mencionar estudos futuros que poderão ser úteis para complementar o problema em estudo. Em primeiro lugar, apesar de no caso em análise, os resultados obtidos, utilizando um programa que utiliza o método dos elementos finitos e o método de equilíbrio limite, terem sido semelhantes, poderão existir outras barragens em que tal não suceda. Barragens com maciços estabilizadores menos permeáveis ou mais inclinados com albufeiras que possam sofrer abaixamentos mais bruscos, nesses casos, a sua estabilidade pode ser mais sensível ao esvaziamento rápido podendo o método de equilíbrio limite não ser adequando para o dimensionamento nessa situação.

Finalmente, reconhecendo as limitações do dimensionamento através de métodos de equilíbrio limite, será importante passar a aproveitar as potencialidades do dimensionamento através do método dos elementos finitos pois este permite o estudo de regimes de escoamento variáveis, uma condicionante de particular importância no contexto deste problema.

Bibliografia

- Berilgen, M. M. (2007). Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics*, 34, 81–91.
- Cedergren, H. R. (1989). *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. John Wiley & Sons.
- United States Society on Dams - Committee on Materials for Embankment Dams (2011). *Materials for Embankment Dams*. In United States Society on Dams (Ed.).
- Decreto-lei nº 344/2007 de 15 de Outubro. *Diário da República*, 1.^a série — N.º 198. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Regulamento de Segurança de Barragens
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). *Geotechnical engineering of dams*. A.A. Balkema.
- Ferreira, A. S., Almeida, A. B., Quintela, A. d., Pinheiro, A. d., Gomes, A. S., Castro, A. T., . . . Martins, J. (2001). *Curso de Exploração e Segurança de Barragens*. Instituto da Água.
- Fredlund, M., Lu, H., & Feng, T. (2011). Combined Seepage and Slope Stability Analysis of Rapid Drawdown Scenarios for Levee Design. In A. S. Engineers, *Geo-Frontiers 2011 Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 1595-1604).
- Guidicini, G., & Nieble, C. M. (1984). *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. Edgard Blücher LTDA.
- Hammouri, N. A., Husei, A., & Yamin, M. M. (2008). Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 471-478.
- Huang, M., & Jia, C.-Q. (2009). Strength reduction FEM in stability of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage. *Computers and Geotechnics*, 36, 93-101.

- Kerkes, D. J., & Fassett, J. B. (2006). Rapid drawdown in drainage channels with earthen side slopes. *Proceedings of the ASCE Texas Section Spring Meeting*, 19-22.
- Lee, I. K., White, W., & Ingles, O. G. (1983). *Geotechnical engineering*. Melbourne: Pitman.
- Lu, N., & Likos, W. J. (2006). Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (2), 131-142.
- Moayed, R. Z., Rashidian, V., & Izadi, E. (2012). Evaluation of phreatic line in homogeneous earth dams. In U. S. Dams, *Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management* (pp. 619-626).
- Morgenstern, N. (1963). Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. *Géotechnique*, 13, 121 –131.
- Maranha das Neves, E. (1975). *Obras de Terra*. Universidade Nova de Lisboa.
- Pauls, G., Sauer, E. K., Christiansen, E., & Widger, R. (2011). A transient analysis of slope stability following drawdown after flooding of a highly plastic clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 1151-1171.
- Pinyol, N. M., Alonso, E. E., & Olivella, S. (2008). Rapid drawdown in slopes and embankments. *Water Resources Research*, 44.
- Portaria n.º 246/98. *DR 93/98 SÉRIE I-B de 1998-04-21*. Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, do Equipamento, do Planeamento da Administração do Território, da Economia, da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas e do Ambiente. Aprova as Normas de Construção de Barragens.
- Portaria n.º 846/93. *DR 213/93 SÉRIE I-B de 1993-09-10*. Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, da Agricultura, da Indústria e Energia, das Obras Públicas, Transportes e Comunicações e do Ambiente e Recursos Naturais. Aprova as Normas de Projecto de Barragens.
- Portaria n.º 847/93. *DR 213/93 SÉRIE I-B de 1993-09-10*. Ministérios da Defesa Nacional, da Administração Interna, da Agricultura, da Indústria e Energia, das Obras Públicas, Transportes e Comunicações e do Ambiente e Recursos Naturais. Aprova as Normas de Observação e Inspeção de Barragens.

- Quintas, F. E. (2002). *Planeamento da Construção de Barragens de Terra*. Dissertação para obtenção do grau de mestre apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Quintela, A., & Santana, T. (2011). Elementos de apoio à disciplina Obras de Terra, Departamento de engenharia civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Reference Manual for Plaxis 2D. (2010). Delft, Netherlands.
- Singh, B., & Varshney, R. (1995). *Engineering for Embankment Dams*. A.A. Balkema.
- Stephens, T. (2011). *Manual sobre pequenas barragens de terra - Guia para a localização, projecto e construção*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuno, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall.
- Viratjandr, C., & Michalowski, R. L. (2006). Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, 802-814.
- Wright, S., & Duncan, J. (2003). Engineering design - Slope stability. *Engineer Manual*. Washington, D.C.: US Army Corps of Engineers.